

Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio y análisis para la implantación de un sistema  
GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria

Autor: Álvaro Jiménez González

Tutor: Javier Niño Orti

**Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Aeroespacial

# **Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria**

Autor:  
Álvaro Jiménez González

Tutor:  
Javier Niño Orti

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019





Proyecto Fin de Carrera: GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria

Autor: Álvaro Jiménez González

Tutor: Javier Niño Orti

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

Con este Trabajo Fin de Máster doy por cerrada una etapa. Mi etapa universitaria. Aquella que empecé allá por 2011 y recordaré siempre como una de las mejores que me haya tocado vivir. Por ello, me gustaría agradecer en estas líneas a todos aquellos que han hecho posible que esto suceda.

En primer lugar, a mi familia. A mi madre Sara, mi padre Ángel y a mi hermano Jorge. Ellos son principales culpables de que hoy esté aquí y sin quienes no habría podido conseguir todo lo que me propuse.

A mis amigos. Si dicen que los amigos de verdad se cuentan con los dedos de una mano, a mí me faltan dedos para contarlos con ambas. Gracias a todos ellos por hacerme sentir allá donde fuera, en Algeciras, en Sevilla o en Milán como si estuviera siempre en casa.

A mi tutor Javier, por confiar en mí para sacar adelante este proyecto incluso estando a una gran distancia.

Y también, a mis compañeros de AERTEC Solutions, quienes en todo momento han estado dispuestos a ayudarme e inspirarme para que este proyecto salga adelante.

A todos vosotros, gracias. Gracias porque cada uno, en mayor o menor medida, ha hecho posible que de por cumplido, con este Trabajo Fin de Máster, uno de los retos más importantes de mi vida.

*Álvaro*

*Sevilla, 2019*



El presente Trabajo Fin de Máster, titulado “Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria”, tiene por objetivo el estudio de un sistema de ayuda a la aproximación GBAS (Ground-Based Augmentation System) y su potencial implantación en el Aeropuerto de Gran Canaria.

Inicialmente, el objetivo del proyecto consideraba al Aeropuerto de Málaga como aeródromo para la implantación del GBAS. No obstante, a la hora de asignar este Trabajo Fin de Máster, ya existía un GBAS instalado y funcionando en el aeropuerto malagueño. En consecuencia, se optó por modificar el objetivo y elegir el Aeropuerto de Gran Canaria para el desarrollo del proyecto, por motivos que se describirán más adelante.

El proyecto consta de dos bloques principales: un primer bloque de carácter teórico en el que se desarrollan los conceptos claves del GBAS y un segundo bloque de mayor carácter práctico que abarca el análisis y desarrollo de la instalación del GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria.

En el primer bloque se presenta el aeropuerto en cuestión, analizando su enclave, naturaleza y situación actual. A continuación, se desarrollan los conceptos teóricos sobre el GBAS y sus ventajas como sistema de ayuda a la navegación en procedimientos de aproximación de precisión. Así mismo, se hace mención al papel actual de dicho sistema en la aviación europea. Posteriormente, se analizan los equipos necesarios y la normativa aplicable para la implantación del GBAS en un aeropuerto.

El segundo bloque tiene como objetivo desarrollar el proyecto de la instalación del GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria. El análisis de otros aeropuertos que operan con GBAS en la actualidad permite diseñar con criterio la implantación del sistema en el aeropuerto canario. Así mismo, se elabora un presupuesto orientativo que determine el coste de la instalación completa para posteriormente compararlo con el coste de su sistema homólogo como es el ILS.

Finalmente, y con el objetivo de verificar la efectividad del GBAS en el aeropuerto canario, se realiza un estudio de capacidad de pista. Este se realiza tanto con las condiciones previas como las posteriores una vez que el GBAS está en funcionamiento, para poner de manifiesto el aumento en la capacidad del campo de vuelos que este sistema genera en el Aeropuerto de Gran Canaria.



# Abstract

---

The scope of this thesis entitled "Study and analysis for the implementation of a GBAS system at Gran Canaria Airport", covers the previous study of a GBAS (Ground-Based Augmentation System) and its potential implementation at Gran Canaria Airport.

Initially, the objective of the project considered Malaga Airport as the chosen aerodrome for the implementation of GBAS. However, at the time of assigning this thesis, a GBAS was already installed and operating at Malaga. Consequently, it was decided to modify the objective and choose the Gran Canaria Airport for the development of the project, for reasons that will be described later.

The project consists of two main sections: a first block in which the key theoretical concepts of the GBAS are discussed and a second block which covers the analysis and development of the GBAS installation at Gran Canaria Airport.

The first block presents the airport, analyzing its enclave, nature and current situation. Next, the theoretical concepts about GBAS and its advantages as a navigation aid system in precision approximation procedures are developed. Mention is also made of the current role of this system in European aviation. Subsequently, the necessary equipment and applicable regulations for the implementation of GBAS at an airport are analyzed.

The aim of the second block is to develop the GBAS installation project at Gran Canaria Airport. The analysis of similar airports that currently operate with GBAS allows the implementation of the system at the Canary Islands airport to be designed with the same criteria. An approximate budget is also drawn up to determine the cost of the complete installation comparing it to the cost of an ILS system.

Finally, in order to validate the project, a runway capacity study is carried out. This is done both with the previous and subsequent conditions once the GBAS is in operation, to show the increase in the airfield capacity that this system generates at Gran Canaria Airport.





<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>16</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>19</b>
<b>Notación</b>	<b>23</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>26</b>
1.1 <i>Sistemas precedentes. El ILS</i>	26
1.2 <i>El concepto GBAS</i>	27
1.3 <i>Aeropuerto de Gran Canaria</i>	28
1.3.1 Entorno	28
1.3.2 Infraestructura e instalaciones	28
1.3.3 Tráfico aéreo	32
<b>2 Navegación por satélite. GNSS</b>	<b>34</b>
2.1 <i>Requisitos de los sistemas GNSS. Performance Based Navigation (PBN)</i>	34
2.1.1 Navegación RNAV y RPN	34
2.1.2 Requisitos PBN para sistemas GNSS	36
<b>3 Ground Based Augmentation system. GBAS</b>	<b>39</b>
3.1 <i>Descripción general</i>	39
3.2 <i>Arquitectura del Sistema</i>	40
3.2.1 Subsistema satélite	41
3.2.2 Subsistema aeronave	41
3.2.3 Subsistema terrestre	44
3.3 <i>Características de la señal GBAS</i>	47
3.3.1 Estructura del mensaje digital	47
3.3.2 Definición de la trayectoria de aproximación final	51
3.3.3 Cobertura de la señal	52
3.4 <i>Aplicaciones del GBAS. Categorías de aproximación de precisión</i>	53
3.5 <i>Ventajas del GBAS</i>	54
3.5.1 GBAS frente a ILS	55
3.5.2 Beneficios del GBAS	56
3.6 <i>GBAS en la actualidad</i>	57
<b>4 Marco teórico</b>	<b>59</b>
4.1 <i>Posicionamiento diferencial por satélite</i>	59
4.2 <i>Cálculo de correcciones diferenciales y pseudodistancia corregida</i>	61
4.3 <i>Fuentes de error en las correcciones GBAS. Niveles de protección y alerta</i>	63
4.3.1 Contribución al error de pseudodistancia del subsistema terrestre	64
4.3.2 Contribución al error de pseudodistancia del subsistema aeronave	65
4.3.3 Error de incertidumbre troposférica residual	65
4.3.4 Error ionosférico residual	66

4.3.5	Error total en pseudodistancia corregida	67
4.3.6	Niveles de protección y alerta	68
4.3.7	Niveles de protección	69
4.3.8	Límites de alerta	71
<b>5</b>	<b>Requisitos normativos para la instalación del gbas</b>	<b>73</b>
5.1	<i>Requisitos normativos</i>	73
5.2	<i>Consideraciones de emplazamiento para antenas GNSS</i>	76
5.2.1	Distancia máxima entre GRP y LTP	76
5.2.2	Máscara de elevación de horizonte	76
5.2.3	Reflexiones (multipath) de la señal GNSS y servidumbre LOCA	77
5.2.4	Reflexiones correladas. Distancia mínima de separación	79
5.2.5	Monitoreo de efectos ionosféricos. Distancia máxima de separación	80
5.2.6	Distancia a zonas públicas	80
5.3	<i>Consideraciones de emplazamiento para antenas VDB</i>	81
5.3.1	Restricciones generadas por las superficies limitadoras de obstáculos	81
5.3.2	Volumen de cobertura antenna VDB	81
5.3.3	Máxima densidad de potencia admisible	81
5.3.4	Local Object Consideration Area (LOCA) de antenna VDB	82
5.4	<i>Consideraciones de emplazamiento de la unidad de procesamiento</i>	82
<b>6</b>	<b>Emplazamiento del subsistema terrestre GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria</b>	<b>83</b>
6.1	<i>Conceptos generales</i>	83
6.1.1	Áreas potenciales de instalación	83
6.1.2	Análisis de la señal GNSS	84
6.1.3	Medida de la contaminación radioeléctrica	84
6.2	<i>Benchmarking. Instalaciones GBAS en otros aeropuertos.</i>	84
6.2.1	Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol	85
6.2.2	Aeropuerto Internacional de Bremen	86
6.2.3	Aeropuerto de Frankfurt del Meno	88
6.2.4	Aeropuerto Internacional de Sydney-Kingsford Smith	89
6.3	<i>Emplazamiento en el Aeropuerto de Gran Canaria</i>	92
6.3.1	Extensión aeroportuaria	92
6.3.2	Análisis de la zona de emplazamiento adoptada	94
6.3.3	Emplazamiento de los equipos	99
<b>7</b>	<b>Alimentación e interconexión de equipos</b>	<b>114</b>
7.1	<i>Alimentación eléctrica de los equipos del GBAS</i>	114
7.2	<i>Red de interconexión del GBAS</i>	117
<b>8</b>	<b>Cálculo de capacidad de pista</b>	<b>120</b>
8.1	<i>Metodología de cálculo</i>	120
8.2	<i>Estado de partida</i>	123
8.2.1	Características del campo de vuelos	123
8.2.2	Porcentaje de uso de pistas	125
8.2.3	Factores meteorológicos	126
8.2.4	Separación de aeronaves por estela turbulenta	127
8.2.5	Separación de aeronaves debida a procedimientos de control aéreo	128
8.2.6	Mezcla anual de tráfico	129
8.2.7	Condicionantes operativos	131
8.3	<i>Resultados del cálculo de capacidad de pista</i>	132
8.3.1	Pista 03L/21R	132
8.3.2	Pista 03R/21L	135
8.3.3	Análisis de resultados	140
<b>9</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>141</b>
9.1	<i>Viabilidad económica. GBAS vs ILS</i>	146

<b>ANEXOS</b>	<b>148</b>
<i>Anexo I: Listado de estaciones GBAS en el mundo</i>	<i>148</i>
<i>Anexo II: Parámetros para el cálculo de las contribuciones de error en pseudodistancia</i>	<i>150</i>
Parámetros de designador GAD	150
Parámetros de designador AAD	150
<i>Anexo III: Proyección de los errores del dominio de la pseudodistancia al dominio de la posición</i>	<i>151</i>
<i>Anexo IV: Superficies limitadoras de obstáculos</i>	<i>154</i>
Servidumbres aeronáuticas de aeródromo	154
<i>Anexo VI: Runway Exit Design Interactive Model (REDIM)</i>	<i>158</i>
<b>Referencias</b>	<b>161</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1–1. Distancias declaradas Aeropuerto de Gran Canaria	29
Tabla 1–2. Instalaciones de ayuda a la navegación en LPA	31
Tabla 1–3. Instalaciones ILS en LPA	31
Tabla 1–4. Aeronaves con mayor número de operaciones en el Aeropuerto de Gran Canaria en el año 2016.	33
Tabla 2–1. Especificaciones exigidas para sistemas de ayuda a la navegación según el tipo de operación. Fuente: OACI [4]	37
Tabla 2–2. Especificaciones de un sistema GNSS standard. Fuente: BEYOND [5]	37
Tabla 3–1. Estructura del mensaje digital VDB transmitido por el GBAS	48
Tabla 3–2. Estructura del bloque Final Approach Segment (FAS)	49
Tabla 3–3. Categorías de aproximación de precisión	54
Tabla 4–1. Valores de $Kffmd$ para el cálculo de LPL y VPL	70
Tabla 4–2. Límite de alerta lateral para aproximaciones de precisión de Categoría I	71
Tabla 4–3. Límite de alerta vertical para aproximaciones de precisión de Categoría I	71
Tabla 5–1. Criterios de emplazamiento para los elementos del subsistema terrestre GBAS. Fuente: FAA [8]	75
Tabla 6–1. Características de las instalaciones GBAS en otros aeropuertos	91
Tabla 6–2. Requisitos de instalación para antenas RRA	101
Tabla 6–3. Coordenadas y elevación antenas RRA. Configuración 1	102
Tabla 6–4. Coordenadas y elevación antenas RRA. Configuración 2	105
Tabla 6–5. Elevaciones de antenas, LOCAs y terreno. Configuración 2	106
Tabla 6–6. Coordenadas y elevación antena VDB y Shelter. Configuración 2	110
Tabla 6–7. Servidumbre radioeléctrica para emisores VHF/UHF según Real Decreto [16]	111
Tabla 6–8. Coordenadas y elevación del terreno en la ubicación de los elementos del GBAS	113
Tabla 8–1. Porcentajes de utilización (año 2017). Pistas 03L/21R y 03R/21L	126
Tabla 8–2. Valores medios de días de lluvia al mes en el Aeropuerto de Gran Canaria	126
Tabla 8–3. Valores medios de días de lluvia al año en el Aeropuerto de Gran Canaria	126
Tabla 8–4. Clasificación de aeronaves por peso máximo al despegue. Fuente: OACI [23]	128
Tabla 8–5. Distancias mínimas de separación por estela turbulenta. Fuente: OACI [23]	128
Tabla 8–6. Categorías de aeronave. Fuente: OACI [9]	130
Tabla 8–7. Muestra de aeronaves empleada en el cálculo REDIM	131
Tabla 8–8. Porcentaje de uso por cabecera en el Aeropuerto de Gran Canaria. Año 2016	132
Tabla 8–9. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 03L	133
Tabla 8–10. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 21R	134
Tabla 8–11. Porcentajes de uso de ambas cabeceras de pista 21R/03L	134
Tabla 8–12. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 03R	136

Tabla 8–13. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 21L	137
Tabla 8–14. Porcentajes de uso de ambas cabeceras de pista 21L/03R	137
Tabla 8–15. Variación en la capacidad de pista. Pre y post GBAS.	140
Tabla A–1. Parámetros asociados al designador del GAD para el cálculo de la contribución del subsistema terrestre al error de pseudodistancia. Fuente: OACI [4]	150
Tabla A–2. Parámetros asociados al designador del AAD para el cálculo de la contribución del subsistema terrestre al error de pseudodistancia. Fuente: OACI [4]	150
Tabla A–3. Características de la superficie de ascenso al despegue. Fuente: BOE [17]	155
Tabla A–4. Características de la superficie de aproximación. Fuente: BOE [17]	156



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Flujo de información GBAS	27
Figura 1-2. Plano de aeródromo OACI. Aeropuerto de Gran Canaria	30
Figura 1-3. Configuraciones de operación de aeronaves en LPA.	31
Figura 1-4. Evolución anual de operaciones y AHD en el Aeropuerto de Gran Canaria	32
Figura 2-1. Conceptos de navegación convencional, RNAV y RPN	35
Figura 2-2. Tipos de especificaciones de navegación. Fuente: ICAO [4]	36
Figura 3-1. Esquema de funcionamiento de un GBAS	40
Figura 3-2. Subsistemas del GBAS	40
Figura 3-3. Satélite GPS	41
Figura 3-4. Esquema del subsistema aeronave GBAS	42
Figura 3-5. Pantalla Principal de Vuelo. GLS (izquierda) vs ILS (derecha)	43
Figura 3-6. NAV Tuning Unit del Multi Mode Receiver	43
Figura 3-7. Esquema del subsistema aeronave GBAS	44
Figura 3-8. GBAS Reference Receiver Antenna (RRA). Fuente: Melbourne Airport.	45
Figura 3-9. Caseta de unidad de procesamiento GBAS. Fuente: Aeropuerto de Frankfurt	46
Figura 3-10. Unidad de procesamiento Honeywell SLS-4000.	46
Figura 3-11. Mástil y antena VDB de la unidad de procesamiento. Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol	47
Figura 3-12. Definición del segmento de aproximación final (FAS). Fuente: OACI [4]	52
Figura 3-13. Área de cobertura mínima GBAS. Fuente: OACI [4]	53
Figura 3-14. Área crítica del ILS	55
Figura 3-15. Diferentes tipos de aproximaciones mediante GBAS	56
Figura 3-16. Aeropuertos con GBAS alrededor del mundo. Fuente: flygls.net	58
Figura 4-1. Representación gráfica de trilateración de la posición mediante satélite	60
Figura 4-2. Función de densidad de probabilidad para diferentes distribuciones gaussianas.	63
Figura 4-3. Atenuación troposférica (dB/km) para diferentes. Fuente [6]	66
Figura 4-4. Oblicuidad de la señal GNSS	67
Figura 4-5. Nivel de protección y límite de alerta lateral	69
Figura 4-6. Nivel de protección y límite de alerta vertical	69
Figura 4-7. Definición de los parámetros D y H en el cálculo de los límites de alerta. Fuente: OACI [4]	72
Figura 5-1. Antena GNSS en el Aeropuerto de Sydney	76
Figura 5-2. Multipath en antena receptora GBAS	77
Figura 5-3. LOCA de antena RRA. Fuente: FAA [8]	79
Figura 6-1. Medidas del nivel de contaminación radioeléctrica en el Aeropuerto de Braunschweig Wolfsburg. [10]	84
Figura 6-2. Área de instalación GBAS en AGP	85

Figura 6-3. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en AGP	86
Figura 6-4. Área de instalación GBAS en BRE	87
Figura 6-5. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en BRE	87
Figura 6-6. Área de instalación GBAS en FRA	88
Figura 6-7. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en FRA	89
Figura 6-8. Área de instalación GBAS en SYD	90
Figura 6-9. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en SYD	91
Figura 6-10. Zonas de potencial emplazamiento del GBAS en LPA	93
Figura 6-11. Zona norte de potencial emplazamiento del GBAS en LPA	93
Figura 6-12. Zona sur de potencial emplazamiento del GBAS en LPA	94
Figura 6-13. Características físicas de las pistas del Aeropuerto de Gran Canaria. Fuente: ENAIRE [15]	95
Figura 6-14. RESA y franjas de pista del Aeropuerto de Gran Canaria. Cabeceras 03L y 03R.	95
Figura 6-15. Servidumbres aeronáuticas en el Aeropuerto de Gran Canaria. Zona de interés.	96
Figura 6-16. Servidumbres aeronáuticas en el Aeropuerto de Gran Canaria. Vulneración por terreno.	97
Figura 6-17. Superficie de aproximación cabecera 03L. Vulneración por terreno. Vista en planta.	97
Figura 6-18. Superficie de aproximación cabecera 03L. Vulneración por terreno. Vista de perfil.	98
Figura 6-19. Representación aproximada de zonas críticas/sensibles y área vallada de ILS en la cabecera 03L.	99
Figura 6-20. GBAS LOCA	100
Figura 6-21. Posición antenas RRA.	101
Figura 6-22. LOCAs antenas RRA.	101
Figura 6-23. Elevación del terreno medida mediante LIDAR en área de interés. Fuente: Grafcan	103
Figura 6-24. Detalle 3D de la vulneración de la LOCA RRA 4 (Configuración 1) por el terreno. Fuente: Google Earth Pro	103
Figura 6-25. Perfil de elevación del terreno alrededor de RRA 4 (Configuración 1). Fuente: Google Earth Pro	104
Figura 6-26. Posición antenas RRA.	105
Figura 6-27. Posición antenas RRA.	105
Figura 6-28. Detalle 3D de la LOCA RRA 4 (Configuración 2). Fuente: Google Earth Pro	106
Figura 6-29. Configuración final adoptada para antenas RRA. (Configuración 2)	107
Figura 6-30. Configuración final adoptada para antenas RRA. (Configuración 2)	108
Figura 6-31. Zona vulneración de servidumbres por terreno	109
Figura 6-32. Topografía LIDAR de la zona afectada	109
Figura 6-33. Ubicación elegida para la antena VDB y Shelter	110
Figura 6-34. Servidumbre radioeléctrica. Antena VDB GBAS.	111
Figura 6-35. Servidumbre radioeléctrica. Antena VDB GBAS. Detalle de vulneración.	112
Figura 6-36. Emplazamiento definitivo de los elementos del subsistema terrestre GBAS	113
Figura 7-1. Anillo 1 y Centros de Transformación asociados del Aeropuerto de Gran Canaria. Conexión Con elementos del GBAS	115
Figura 7-2. Esquema unifilar del Anillo 1	116
Figura 7-3. Esquema unifilar del Anillo 1 tras instalación del C.T. GBAS	116



Figura 7-4. Anillo secundario de alimentación eléctrica para RRAs	117
Figura 7-5. Ubicación de la torre de control con respecto a los elementos del GBAS	118
Figura 7-6. Trazado de la red de información entre GBAS y TWR	119
Figura 7-7. Detalle de nueva canalización de la red de información entre GBAS y TWR	119
Figura 8-1. Niveles de análisis para el cálculo de la capacidad de pista [19]	121
Figura 8-2. Tiempos t1, t2, t3 y t4 de ocupación de pista	122
Figura 8-3. Campo de vuelos. Aeropuerto de Gran Canaria	124
Figura 8-4. Características físicas de las pistas. Aeropuerto de Gran Canaria	124
Figura 8-5. Perfil longitudinal de las pistas. Aeropuerto de Gran Canaria	125
Figura 8-6. Distancias declaradas. Aeropuerto de Gran Canaria	125
Figura 8-7. Rosa de los vientos. Aeropuerto de Gran Canaria	127
Figura 8-8. Clasificación de aeronaves por letra clave según el número de operaciones. Aeropuerto de Gran Canaria 2016	130
Figura 8-9. Configuraciones de operación de aeronaves en LPA.	132
Figura 8-10. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 03L	133
Figura 8-11. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 21R	134
Figura 8-12. Capacidad de pista 03L/21R en función de la distribución de operaciones	135
Figura 8-13. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 03R	136
Figura 8-14. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 21L	137
Figura 8-15. Capacidad de pista 03R/21L con GBAS en función de la distribución de operaciones	139
Figura 8-16. Capacidad de pista 03R/21L sin GBAS en función de la distribución de operaciones	139
Figura 9-1. Composición del presupuesto para la instalación del GBAS	146
Figura 9-2. Comparativa inversión GBAS vs ILS	147
Figura A-1. Superficies limitadoras de obstáculos. Fuente: OACI [4]	157
Figura A-2. Mezcla de aeronaves empleada en el cálculo de capacidad de pista mediante REDIM.	158
Figura A-3. Datos de partida. REDIM.	159
Figura A-4. Tablas de resultados ROT. REDIM	159
Figura A-5. Gráficos de resultados ROT 1. REDIM	160
Figura A-6. Gráficos de resultados ROT 2. REDIM	160



# Notación

---

AAD	Aircraft Accuracy Designator
ABAS	Aircraft Based Augmentation System
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AGP	Aeropuerto de Málaga
AHD	Aeronaves Hora Diseño
AIP	Aeronautical Information Publication
APP	Servicio de Control de Aproximación
AROT	Aircraft Runway Occupancy Time
ARP	Airport Reference Point
ASDA	Accelerate Stop Distance Available
ATM	Air Traffic Management
BOE	Boletón Oficial del Estado
BRE	Aeropuerto de Bremen
CAT I/II/III	Aproximación Instrumental de Precisión Categoría I/II/III
DCP	Punto de Cruce de Referencia
DME	Distance Measuring Equipment
EASA	Agencia Europea de Seguridad Aérea
ECEF	Sistema de Referencia de Coordenadas Earth-Centered Earth-Fixed
FAA	Federal Aviation Administration
FAS	Final Approach Segment
FPAP	Punto de Alineación de la Trayectoria de Vuelo
FRA	Aeropuerto de Frankfurt
GAD	Ground Accuracy Designator
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCID	Ground Continuity Integrity Designator
GLS	GBAS Landing System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GP	Senda de Planeo
GPA	Ángulo de Senda de Planeo
GPIP	Punto de intersección de la trayectoria de planeo
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GRAS	Ground Based Regional Augmentation System
GRP	GBAS Reference Point
HPL	Nivel de Protección Horizontal
IATA	Asociación Internacional de Transporte Aéreo
IFM	Ionospheric Field Monitor
IFR	Reglas de Vuelo Instrumental
ILS	Sistema Instrumental de Aterrizaje
LDA	Landing Distance Available

LIDAR	Light Detection and Ranging
LLZ	ILS Localizer
LOC	Localizador de ILS
LOCA	Local Object Consideration Area
LPA	Aeropuerto de Gran Canaria
LPL	Nivel de Protección Lateral
LTP	Punto de Umbral de Aterrizaje
MLS	Microwave Landing System
MMR	Multi-Mode Receiver
MTOW	Maximum Take Off Weight
NAV	Navigation Receiver
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OLS	Superficie Limitadora de Obstáculos
PAPI	Precision Approach Path Indicator
PBN	Performance Based Navigation
PRC	Corrección Diferencial de Pseudodistancia
RRA	Reference Receiver Antenna
REDIM	Runway Exit Design Interactive Model
RESA	Runway End Safety Area
RFI	Radio Frequency Interference
RNAV	Area Navigation
ROT	Runway Occupancy Time
RRC	Corrección de Tasa de Alcance
RVR	Alcance Visual en Pista
RWY	Runway
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SEI	Servicio de Extinción de Incendios
SES	Single European Sky
SYD	Aeropuerto de Sydney
TCAN	Tactical Air Navigation System
TCH	Altura de Cruce del Umbral
TODA	Take Off Distance Available
TORA	Take Off Run Available
TWR	Torre de Control
VDB	VHF Data Broadcast
VHF	Very High Frequency
VOR	VHF Omnidirectional Range
VPL	Nivel de Protección Vertical
WGS	World Geodetic System



# 1 INTRODUCCIÓN

Desde que, en 1964, en plena guerra fría, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos diseñara el primer sistema de posicionamiento global por satélite conocido como “Sistema TRANSIT” el mundo dejó de perderse. Dicho sistema TRANSIT es considerado el antecesor del actual GPS o “Global Positioning System” y permitía conocer la posición sobre la superficie terrestre mediante la recepción de señales emitidas por una constelación de satélites.

Creado inicialmente con fines militares, no sería hasta 1991 cuando el gobierno estadounidense ofrecería el sistema GPS a la comunidad internacional para fines civiles sin ningún costo alguno. No obstante, dicha señal poseía una degradación intencional denominada “Selective Availability” cuyo fin era limitar la precisión del sistema civil. Fue en mayo del 2000, cuando bajo las órdenes del presidente americano Bill Clinton, el gobierno eliminara esta degradación para hacer el GPS más accesible y útil a toda la comunidad civil internacional.

Desde entonces, se han desarrollado nuevos sistemas de posicionamiento por satélite de funcionamiento similar al GPS. Ejemplo de ello son el GLONASS de la Federación Rusa u otros que se encuentran en desarrollo como el Beidou chino, el IRNSS indio o el Galileo, desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Todos éstos se engloban dentro de la categoría de sistemas GNSS o “Global Navigation Satellite Systems” y son empleados en multitud de ámbitos en la actualidad, entre ellos en el campo aeronáutico.

Debido a los estrictos requisitos de seguridad que se imponen a los equipos de navegación aeronáutica, los sistemas GNSS por sí mismos no son capaces de cumplirlos. Por este motivo, durante los últimos se han desarrollado sistemas de aumentación de señales GNSS para poder aplicar la navegación por satélite en el tráfico aéreo. Aunque estos se empleen tanto para fases en ruta, salidas y diferentes maniobras, este estudio se centrará en la aplicación de la navegación por satélite en la fase de aproximación, en la cual los requisitos de precisión e integridad son aún mayores al tratarse de una de las fases más críticas del vuelo.

De esta forma, aplicando el posicionamiento GNSS a las fases de aproximación, se obtendrán mejores resultados que los que ofrecen los sistemas actuales de ayuda a la aproximación, como el usado principalmente hasta ahora, el sistema ILS.

## 1.1 Sistemas precedentes. El ILS

Desde comienzos de la década de 1960, los aeropuertos de todo el mundo han basado el guiado de sus procedimientos de aproximación y aterrizaje en el sistema “Instrumental Landing System”, comúnmente conocido como ILS.

El ILS es un sistema terrestre de emisión radioeléctrica formado por un grupo de antenas ubicadas usualmente a unos 300 metros al final de cada pista. El ILS consta a su vez de dos subsistemas:

- Un localizador que proporciona guía lateral.
- Una antena de senda de planeo que proporciona la guía vertical.

Mediante la recepción de estas dos señales por el equipo receptor VHF instalado en las aeronaves, el piloto es capaz de situar, durante la fase final de la aproximación, la aeronave sobre la intersección de la senda de planeo y el plano vertical definido por el localizador.

A pesar de que el sistema ILS ha probado su fiabilidad y funcionalidad a lo largo de todos estos años, hoy en día, la disponibilidad de sistemas de navegación por satélite proporciona la posibilidad de implementar nuevos sistemas de aproximación. Mediante una navegación basada en satélite es posible desarrollar un nuevo sistema que se sobreponga a las limitaciones del ILS y sea capaz de atender las necesidades futuras de la navegación aérea de una forma más eficiente. Dicho sistema es el denominado “Ground Based Augmentation System”, de aquí en adelante GBAS.

## 1.2 El concepto GBAS

El sistema GBAS es capaz de emplear la señal emitida por los sistemas globales de navegación por satélite, conocidos como GNSS, para proporcionar el guiado tanto vertical como horizontal a la aeronave durante el procedimiento de aproximación a pista.

Se trata de uno de los tres tipos de sistemas aumentación de señales GNSS empleados en el ámbito aeronáutico junto al ABAS (“Aircraft Based Augmentation System”) y el SBAS (“Satellite Based Augmentation System”). El motivo por el que se emplea la aumentación de señal en este tipo de sistemas es la pobre precisión que ofrecen las señales GNSS por sí mismas, insuficiente para cumplir con los requisitos de navegación aérea que se expondrán más adelante.

El GBAS está basado en un sistema de aumentación y corrección diferencial de la señal GNSS emitida por las diversas constelaciones de satélites disponibles (GPS, GLONASS, Galileo, etc.). Mediante una instalación terrestre ubicada en las inmediaciones de las pistas de vuelo, la señal pasiva emitida por los satélites es corregida, amplificada y posteriormente emitida mediante señales digitales VHF hacia las aeronaves que se encuentren en fase de aproximación. Éstas reciben la señal GBAS, la decodifican y procesan sus cálculos internos para determinar la posición y velocidad, así como para determinar las correcciones necesarias para mantenerse dentro de la trayectoria de aproximación.

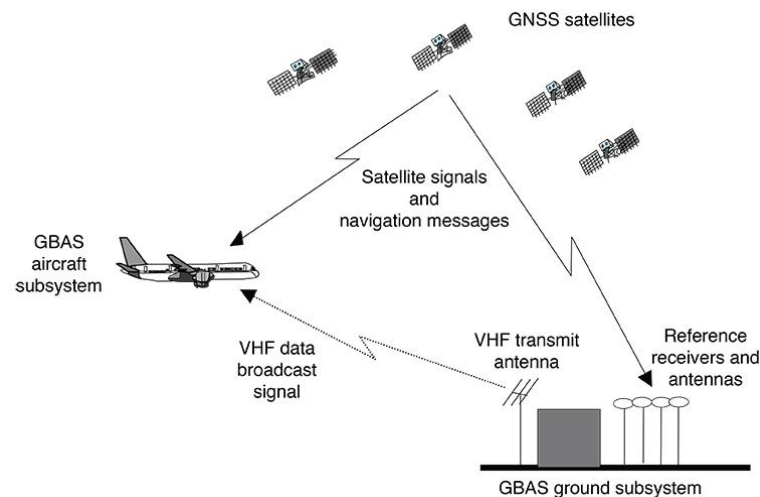


Figura 1-1. Flujo de información GBAS

De esta forma, la ayuda de posicionamiento no se basa en señales radioeléctricas que generan físicamente las trayectorias en el espacio, como ocurre con el ILS. En su lugar, la propia trayectoria es calculada mediante los sistemas de navegación embarcados en la aeronave.

Se trata de un sistema novedoso, el cual se sigue desarrollando y validando en la actualidad por las autoridades aéreas europeas mediante el programa SESAR llevado a cabo por Eurocontrol. A día de hoy, los primeros sistemas GBAS ya se encuentran en funcionamiento. En concreto se trata de sistemas de aproximación de precisión de categoría I, los cuales actualmente están instalados en los aeropuertos europeos de Bremen, Málaga, Zúrich y Frankfurt.

A grandes rasgos, los principales beneficios del uso de un sistema GBAS frente al tradicional ILS son los siguientes:

- Reduce el tiempo de ocupación de pista incrementando el rendimiento de la misma.
- Reduce la distancia de separación entre aterrizajes en condiciones de baja visibilidad.
- Permite el guiado de aproximaciones en curva hacia pista.
- Reduce el número de sistemas y el coste necesario para mantenerlos, tanto para la autoridad aeroportuaria como para el operador aéreo.

Dadas sus ventajas, se prevé que en un futuro próximo la implantación de sistemas GBAS se expanda a un gran número de aeropuertos europeos, considerándola como la siguiente generación de sistemas de ayuda a la aproximación y aterrizaje. Así mismo, se espera que, en varios años, este sistema no solo se emplee en las fases de aproximación final, sino que su uso se extienda también al resto de operaciones dentro de las áreas terminales de maniobras de los aeropuertos, así como al guiado en tierra de las aeronaves dentro del área de movimiento de los aeropuertos.

En los capítulos consecutivos se realizará una descripción tanto de los sistemas GNSS en general como del GBAS en particular.

### 1.3 Aeropuerto de Gran Canaria

Para llevar a cabo la implementación de procedimientos de aproximación basados en GBAS se ha elegido como escenario el Aeropuerto de Gran Canaria. El principal motivo de la elección ha sido la configuración del campo de vuelos del aeropuerto, así como la actual infraestructura que posee en cuanto a instalaciones y sistemas de ayuda a la navegación se refiere. Al contar con dos pistas de vuelo paralelas, un GBAS será capaz de dotar a ambas pistas de procedimientos de aproximación de precisión de categoría I mediante una única estación terrena, como se desarrollará más adelante.

Así mismo, se trata de un aeropuerto con una notable densidad de tráfico aéreo de carácter poco estacional, ya que ésta se distribuye de manera homogénea a lo largo de toda la temporada debido a las particulares características de la Isla de Gran Canaria.

La evolución hacia un sistema de aproximación basado en GBAS permitirá al aeropuerto canario aumentar su rendimiento, reduciendo a la vez los costes, así como dar un paso hacia delante hacia la próxima modernización de los sistemas de navegación proyectada por las autoridades aéreas europeas a través del programa SESAR dirigido por Eurocontrol.

#### 1.3.1 Entorno

La Isla de Gran Canaria pertenece a la provincia de Las Palmas. Con una superficie de 1.561 kilómetros cuadrados y una población total de 843.158 habitantes en 2017, se trata de la segunda isla más poblada del archipiélago canario y primera en cuanto a densidad de población.

Su geología es de constitución volcánica que le otorga un acentuado relieve el cual le otorga una altura máxima de 1.965 metros. De este modo, la ubicación del aeropuerto al este de la isla y en la vecindad de la costa permite a las aeronaves tanto despegar como aproximarse al mismo evitando las zonas centrales de la isla, en las cuales se encuentran los picos más altos de la misma.

Su climatología, la convierte en un magnífico enclave turístico a lo largo de todo el año. Con una temperatura media anual de 20,3°C, un total de 2.822 horas de sol anuales y una media de tan solo 22.1 días de precipitación al año [1], posee un alto número de visitantes orientados a un turismo de sol y playa.

Así mismo, son sus óptimas características climatológicas las que hacen que el aeropuerto tenga unas excelentes condiciones para la ejecución de las operaciones aéreas durante todo el año. Esto supone una garantía para los explotadores del transporte aéreo, los cuales encuentran en Gran Canaria la ventaja de poder realizar sus operaciones sin los inconvenientes derivados de una meteorología adversa.

Los vientos predominantes en la zona provienen del noreste con una magnitud notable, lo que hace que las dos pistas del aeropuerto estén orientadas en dicha dirección, como se analiza a continuación.

#### 1.3.2 Infraestructura e instalaciones

Las principales características de la infraestructura aeroportuaria se presentan a continuación.

Punto de referencia (ARP): La ubicación del punto de referencia del aeródromo viene definida por las siguientes



coordenadas aplicadas al sistema WGS-84.

- Latitud: 27° 55' 54'' N
- Longitud: 15° 23' 11'' W
- Elevación: 24 m (78 ft)
- Declinación magnética: 7° W
- Temperatura de referencia: 27°C

Clasificación del aeropuerto:

- Clase: Internacional
- Horario de operación: H24
- Categoría OACI: 4E
- Categoría SEI: 9
- Indicativo OACI: GCLP
- Indicativo IATA: LPA
- Aeropuertos alternativos: Fuerteventura, Tenerife Sur, Tenerife Norte.

### 1.3.2.1 Subsistema de movimiento de aeronaves

La distribución del lado aire se determina a continuación.

El Aeropuerto de Gran Canaria posee una plataforma con 55 posiciones en total repartidas entre una zona específica para aviación general y otra para aeronaves de pasaje y carga. Dicha plataforma posee un valor de capacidad de 42 aeronaves hora punta.

El aeropuerto consta de dos pistas de vuelo paralelas con una separación entre ejes de 210 metros. Se denominan 03L-21R y 03R-21L respectivamente. En consecuencia, ambas están orientadas en dirección noreste-suroeste con motivo, de las características de los vientos predominantes de la zona. Ambas están conectadas con la plataforma mediante dos calles de rodaje paralelas a las mismas.

Pista	TORA (m)	ASDA (m)	TODA (m)	LDA (m)
RWY 03L	3100	3300	3100	3100
RWY 21R	3100	3300	3300	3100
RWY 03R	3100	3300	3100	3100
RWY 21L	3100	3300	3300	3100

Tabla 1–1. Distancias declaradas Aeropuerto de Gran Canaria

A continuación, se muestra el plano de aeródromo del Aeropuerto de Gran Canaria, extraído del AIP de ENAIRE.

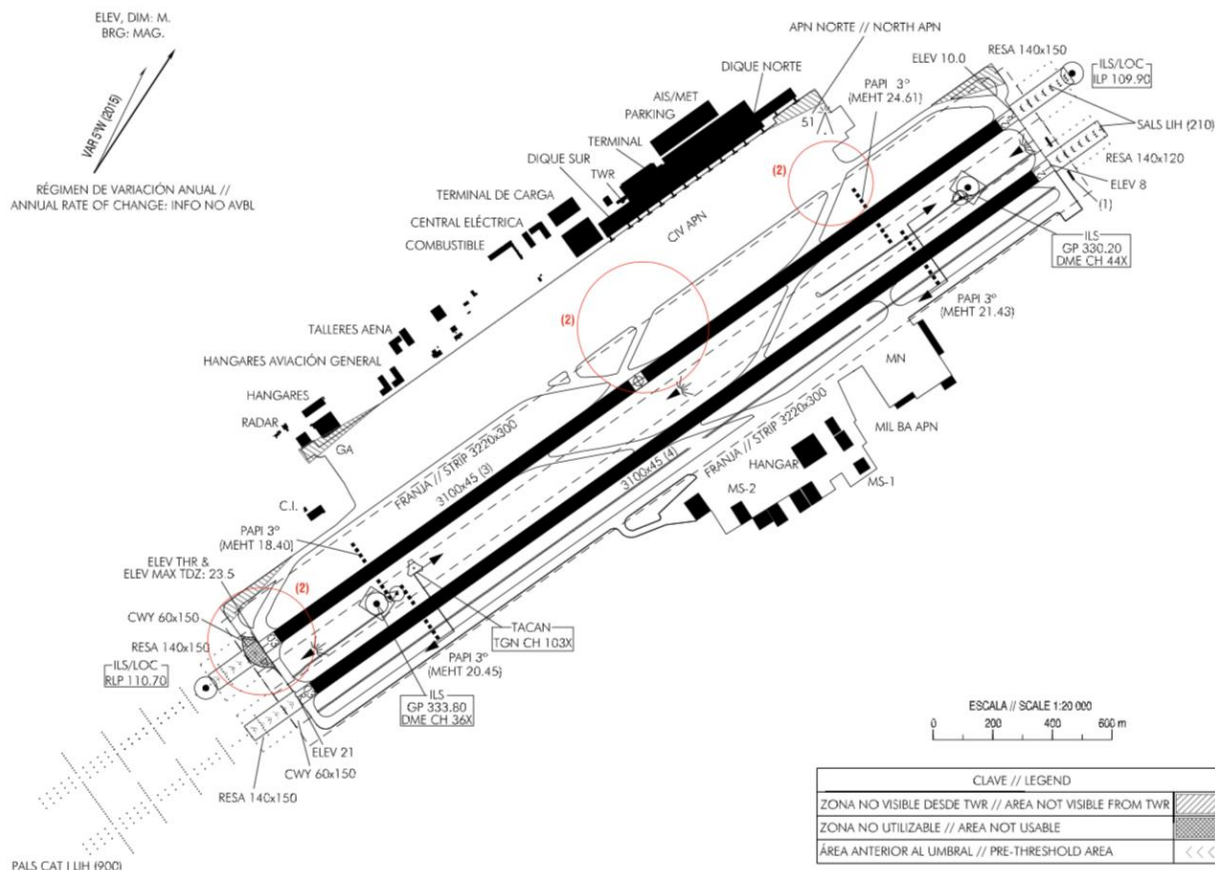


Figura 1-2. Plano de aeródromo OACI. Aeropuerto de Gran Canaria

Una de las pistas, en concreto la 03L-21R, se encuentra equipada con un sistema ILS CAT-I en ambas cabeceras. Por dicho motivo es la más utilizada para procedimientos de aproximación y aterrizaje de aeronaves tanto comerciales como militares.

Dentro de los procedimientos del aeropuerto existen dos posibles configuraciones:

- Configuración Norte:
  - Llegadas por RWY 03L
  - Salidas por RWY 03R
- Configuración Sur:
  - Llegadas por RWY 21R
  - Salidas por RWY 21L



Figura 1-3. Configuraciones de operación de aeronaves en LPA.

No obstante, la configuración norte es la preferente, debido a la presencia de los vientos predominantes, los cuales tienen componente sur. De este modo, aproximadamente el 90% de las operaciones se realizan desde RWY 03R y RWY 03L, quedando las cabeceras 21L y 21R para usos ocasionales o posibles contingencias.

A pesar de contar con dos pistas, la distancia entre ejes de las mismas es únicamente de 210 metros, lo que impide que ambas pistas puedan operar independientemente según la reglamentación de OACI.

De este modo, se emplean de manera segregada, manteniendo una de las cabeceras para despegues y la otra para aterrizajes, ya sea en configuración Norte o Sur. Siendo siempre la pista 03L/21R empleada para aproximaciones dado que es la única que cuenta con aproximación de precisión de CAT I, mediante los ILS que hay presentes en ambas de sus cabeceras.

Debido a esto, durante horas punta pueden ocurrir ciertos niveles de congestión en cuanto a la aproximación y aterrizaje de las aeronaves. De este modo, la instalación de un sistema GBAS supondría dotar a ambas pistas de ayudas a la aproximación de precisión CAT I resolviendo los problemas de congestión que puedan surgir en períodos punta y aumentando la capacidad máxima operativa actual del campo de vuelos en su conjunto.

### 1.3.2.2 Instalaciones de ayuda a la navegación y aterrizaje

Las ayudas radioeléctricas de las que dispone el aeropuerto son:

- Dos estaciones VOR/DME situadas denominadas Pozo Izquierdo (LPC) y El Lasso (GDV).

Instalación	Código	Coordenadas
DVOR	LPC	274942,7 N 0152556,1 W
DME	LPC	274943,2 N 0152555,9 W
DVOR	GDV	280437,5 N 0152544,4 W
DME	GDV	280437,6 N 0152542,8 W
TACAN	TGN	275524,3 N 0152322,2 W

Tabla 1–2. Instalaciones de ayuda a la navegación en LPA

- Sistema ILS CAT I para las cabeceras 03L y 21R compuesto de localizador (LLZ), de senda de planeo (GP) y de radiobalizas exterior e intermedia situadas en la prolongación del eje de pista.

Instalación	Código	Coordenadas
ILS CAT I 21R	RLP	275632,1 N 0152250,7 W
ILS CAT I 03L	ILP	275518,8 N 0152323,6 W

Tabla 1–3. Instalaciones ILS en LPA

- Sistema de iluminación de aproximación con indicación de pendiente de aproximación tipo PAPI en las cuatro cabeceras.

### 1.3.3 Tráfico aéreo

Con un total de 131.739 operaciones en 2018, el Aeropuerto de Gran Canaria se sitúa en el quinto puesto dentro del ranking de aeropuertos españoles en esta categoría. Así mismo, la tendencia de la demanda del tráfico aéreo en el aeropuerto ha sufrido un notable crecimiento a lo largo de los últimos años. En el siguiente gráfico, elaborado mediante los datos del Gobierno de Canarias [2] y las estadísticas de AENA [3], se puede observar la evolución en número de operaciones y Aeronaves Hora Diseño, así como su proyección hasta el año 2035.

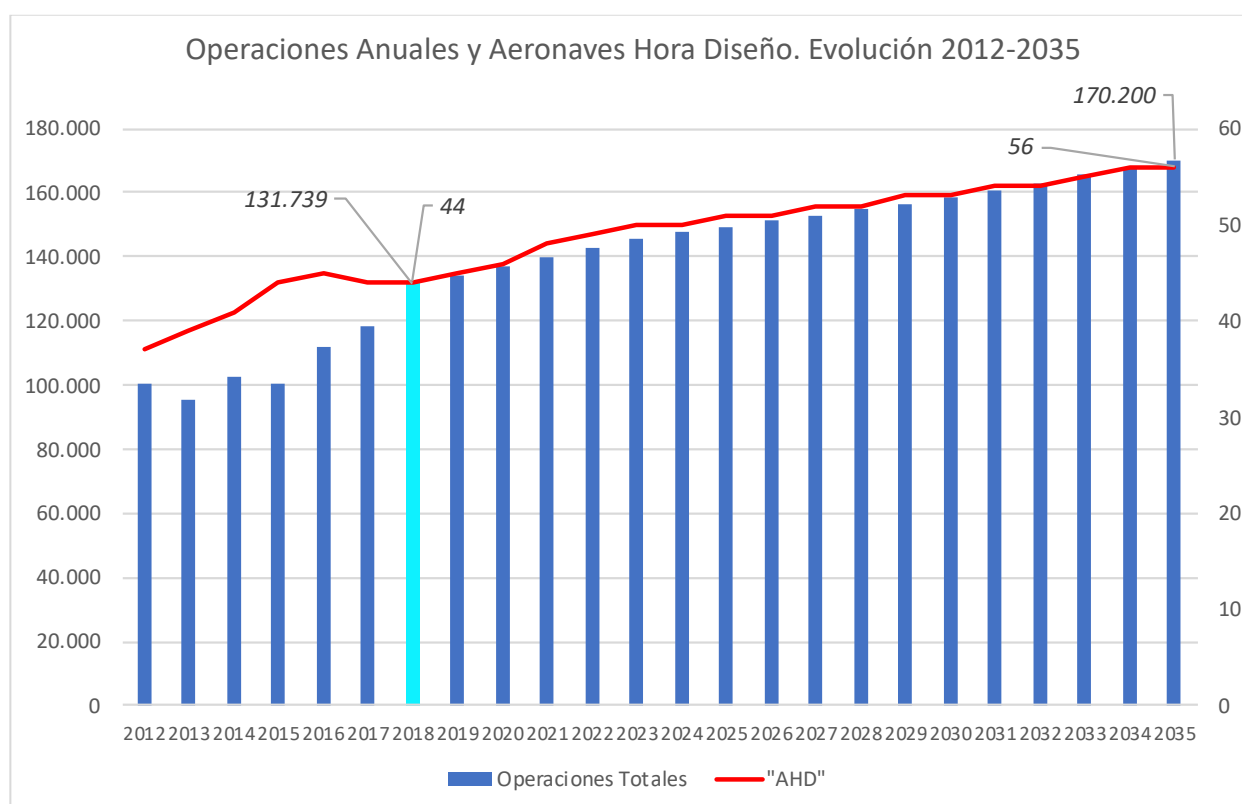


Figura 1-4. Evolución anual de operaciones y AHD en el Aeropuerto de Gran Canaria

Se observa que, en el rango de 2013-2018, el crecimiento ha sido muy notable aumentando en casi un 40% en dicho período a consecuencia de la salida de la crisis económica. Del mismo modo, se prevé que dicho crecimiento se sostenga alcanzando cotas mayores a corto y medio plazo, alcanzando aproximadamente las 170.000 operaciones en el año 2035.

El parámetro Aeronaves Hora Diseño representa el número máximo de operaciones en el intervalo de una hora que se producen en el aeropuerto en el día de diseño. Mediante dicho parámetro es posible caracterizar la demanda de operaciones en el aeropuerto. Como se puede observar, el crecimiento de este es progresivo y constante, siendo de 44 AHD en el año 2018 y esperándose un aumento hasta 56 AHD para el año 2035.

Debido a este crecimiento, ya pronosticado anteriormente, dentro del Plan Director del Aeropuerto de Gran Canaria, elaborado en 2001, se indicaba la futura necesidad de dotar a la cabecera 21R de un sistema de aproximación ILS Categoría I. Dicha ampliación se llevó a cabo en los años anteriores. El siguiente paso, dado el aumento de la demanda, consiste en dotar al aeropuerto de procedimientos de aproximación de precisión en ambas pistas, de forma que se aumente la capacidad y se dé cabida al aumento de demanda en términos de AHD.

Mediante la instalación del sistema GBAS y sus correspondientes procedimientos no solo se dotaría a ambas pistas de aproximación de precisión Categoría I, sino que evitará la necesidad de instalar otros dos nuevos sistemas ILS para cada una de las cabeceras de la pista 03R/21L, ahorrando costes y aumentando la capacidad

de movimiento de aeronaves, ya que el GBAS posee la ventaja de ser capaz de servir a ambas a la vez.

### 1.3.3.1 Aeronaves representativas

Como se analizará posteriormente, para llevar a cabo una aproximación mediante GBAS es necesario que la aeronave se encuentre equipada con los necesarios sistemas de recepción y procesamiento de la señal. En cuanto a fabricantes de aeronaves se refiere, tanto Airbus como Boeing ofrecen la posibilidad de equipar los aviones con estos sistemas.

Haciendo uso de las estadísticas elaboradas por el Aeropuerto de Gran Canaria, se ha calculado el porcentaje representativo de las aeronaves de mayor frecuencia dentro del total de operaciones. Los datos mostrados a continuación son valores de 2016.

Aeronave	Nº de operaciones (2016)	Porcentaje sobre el total
Boeing 737	34.744	15,5%
Airbus A320	22.635	10,1%
ATR 72/42	18.630	8,3%
CRJ 900/1000	5.097	2,3%
Beechcraft 1900	2.413	1,1%
Boeing 757	2.882	1,3%
Airbus A330	1.687	0,8%
Otros	23.908	10,7%

Tabla 1–4. Aeronaves con mayor número de operaciones en el Aeropuerto de Gran Canaria en el año 2016.

Como se observa son tres modelos los que predominan en el aeropuerto canario. Destaca el alto porcentaje que ocupan las aeronaves de la familia ATR 72. Se trata de aeronaves propulsadas mediante turbohélice y empleadas por las compañías regionales como “Binter Canarias” o “Air Europa” para conectar las diferentes islas, o las zonas próximas de la costa africana con Gran Canaria. Estas aeronaves, bajo norma general, no suelen estar dotadas con los sistemas necesarios para operar bajo procedimientos GBAS por lo que deberían seguir aproximaciones ILS.

Si agrupamos las aeronaves de la familia A320 y B737 dentro de un mismo, dado que son de características prácticamente similares, observamos que son los predominantes dentro del conjunto ocupando más de la cuarta parte de las operaciones totales. Se trata de las aeronaves de mayor alcance, propulsadas por turbofans y empleadas aerolíneas que operan desde y hacia las zonas continentales.

Ambos fabricantes, tanto Airbus como las de Boeing, ofrecen la posibilidad de equipar a los aviones con estos sistemas necesarios. De hecho, compañías que operan con frecuencia en el aeropuerto como TUI Fly Belgium o las filiales de Lufthansa (Germanwings) utilizan procedimientos GBAS en aeropuertos como el de Málaga o Bremen.

Unido a ello, debido a la reducción de coste que supone para las aerolíneas evolucionar del ILS a GBAS, la instalación de este sistema en el aeropuerto debe conllevar un aumento en el número de aerolíneas dispuestas a aprovechar la oportunidad y emplearlo.

## 2 NAVEGACIÓN POR SATÉLITE. GNSS

Con el aumento del tránsito aéreo mundial, los sistemas de ayuda a la navegación convencionales, conocidos como NAVAID, no fueron capaces de brindar la flexibilidad necesaria del espacio aéreo para absorber este crecimiento.

El desarrollo por parte de los Estados Unidos de un sistema mundial que brindaba servicios de determinación de la posición, conocido como GPS, ofreció una alternativa a estas NAVAID convencionales, mediante la posibilidad de aplicar nuevos conceptos en la navegación aérea capaces de satisfacer las nuevas necesidades de la comunidad aeronáutica.

Con el desarrollo de nuevos conceptos y sistemas, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) introdujo el Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS), que permite la navegación en todas las fases de vuelo y la aproximación de precisión. De acuerdo con el Volumen 1 del Anexo 10 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional [4], el GNSS está compuesto por:

- El Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS)
- El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS)
- El sistema de navegación basado en la aeronave (ABAS)
- El sistema de navegación basado en tierra (GBAS)
- El sistema de navegación basado en satélites (SBAS)
- El sistema regional de aumentación basado en tierra (GRAS)

En la actualidad, los sistemas de navegación por satélite GNSS son empleados en gran multitud de ámbitos entre los que se encuentra la navegación aérea. Para establecer una normativa común y un procedimiento estandarizado a la hora de implementar los sistemas GNSS en la navegación aérea, OACI ha desarrollado una serie de documentos que contienen los estándares recomendados para ello. Dichos documentos se denominan SARPs, “Standards and Recommended Practices”.

En ellos, OACI define el GNSS como sigue:

*“Un sistema global de determinación de posición y tiempo, que incluye una o más constelaciones de satélites, receptores en las aeronaves y un sistema de monitorización de la integridad, aumentado cuando sea necesario para cumplir los requisitos de RNP (Required Navigation Performance) en función de la operación deseada.”*

En resumen, mediante un sistema GNSS se puede determinar tanto la posición, el tiempo como también la velocidad de las aeronaves o de cualquier vehículo que interfiera en la navegación aérea. Para ello debe cumplir con una serie de requisitos operacionales exigidos dentro de la navegación RNP, la cual se detalla a continuación.

### 2.1 Requisitos de los sistemas GNSS. Performance Based Navigation (PBN)

El PBN consiste en un nuevo concepto de navegación implementado a nivel mundial y promovido por la ICAO.

El continuo aumento del tráfico aéreo unido al aumento de la congestión del espacio aéreo ha llevado a la necesidad de lograr una mayor eficiencia en las operaciones aéreas de manera que se optimicen los recursos limitados disponibles, entre ellos principalmente, el espacio aéreo.

Para ello, la metodología de navegación ha evolucionado desde una navegación convencional basada en normas y metodologías restrictivas, en las que las aeronaves se encontraban restringidas en cuanto a la libertad para trazar sus propias trayectorias, a una navegación de área, conocida como RNAV.

#### 2.1.1 Navegación RNAV y RPN

La nueva metodología RNAV se define como un método de navegación que permite la operación de las aeronaves en cualquier trayectoria de vuelo deseada dentro de las coberturas de las ayudas para la navegación disponibles y de las capacidades de las aeronaves. Para ello las rutas se construyen a través de puntos de recorrido

o waypoints, definidos mediante unas coordenadas geográficas y no mediante estaciones terrestres de ayudas a la navegación como ocurría en la navegación convencional. De este modo la libertad a la hora de operar crece notablemente.

Posteriormente, la navegación RNAV evolucionó a la navegación RNP, “Required Navigation Performance”, la cual básicamente consiste en los mismos principios de la navegación RNAV, pero añade una nueva funcionalidad de vigilancia y alerta de conflictos durante el vuelo. De este modo, mediante la navegación RNP, al incorporar dicha funcionalidad, es posible trazar trayectorias más complejas manteniendo los niveles de seguridad adecuados y por lo tanto optimizando el uso del espacio aéreo.

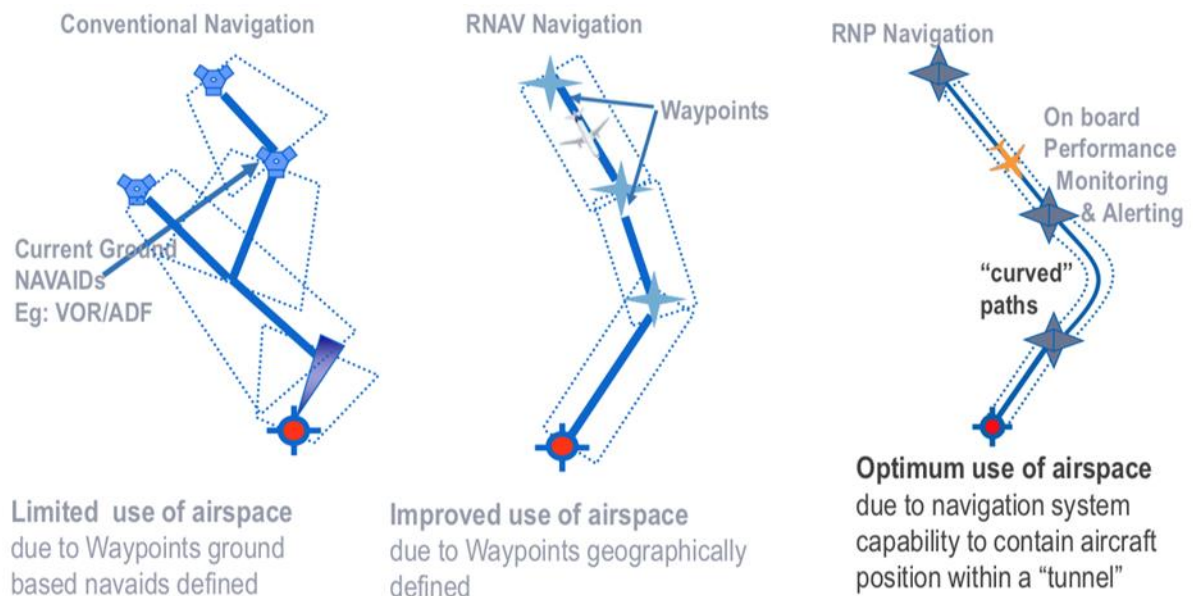


Figura 2-1. Conceptos de navegación convencional, RNAV y RPN

Para emplear una navegación RNAV o RNP es necesario disponer de una serie de sistemas que sean capaces de cumplir unas funciones requeridas, es decir, cumplir con unas especificaciones RNAV o RNP según corresponda. Aquí es donde entra en juego el concepto de PBN.

Anteriormente, los requisitos de navegación, como pueden ser las especificaciones RNAV y RNP, se basaban en una serie de sensores determinados. Es decir, la autoridad exigía que se debían emplear unos sensores y equipos específicos para llevar a cabo la navegación aérea.

A partir de la inclusión de los conceptos RNAV y RNP, se observó que basar estos requisitos consistentes en equipar unos sensores específicos concretos era ineficiente a la vez que costoso. Fue entonces cuando surgió el concepto PBN.

El concepto PBN supone una evolución de la manera de proceder anterior de modo que, en lugar de especificar los requisitos en función de los sensores, éstos se especifiquen en función de unas prestaciones. De esta manera, para llevar a cabo un procedimiento RNAV o un procedimiento RNP no es necesario disponer de una serie de sensores determinados, sino que es suficiente cualquier tipo de sensor o conjunto de ellos que cumplan con los requisitos mínimos de prestaciones impuestos.

Estos requisitos de prestaciones se definen en términos numéricos de:

- **Integridad:** Probabilidad de que se produzca un funcionamiento defectuoso del equipo de navegación.
- **Disponibilidad:** Probabilidad de que un sistema se encuentre preparado para utilizar cuando se lo requiera.
- **Continuidad:** Probabilidad de que en un sistema no se produzca un fallo durante el tiempo de utilización.



- **Funcionalidad:** Capacidades particulares requeridas al sistema. Por ejemplo, presentación de la velocidad con respecto al suelo, tiempo de vuelo hasta el próximo punto de recorrido, etc.

El concepto PBN ofrece ciertas ventajas en comparación con el método de sensores específicos las cuales se describen a continuación:

1. Reduce la necesidad de mantener rutas y procedimientos en función de sensores específicos, reduciendo con ello los costes asociados.
2. Evita tener que desarrollar y modificar las operaciones en función de los sensores cada vez que éstos evolucionan a sistemas de navegación más avanzados.
3. Permite un uso más eficiente del espacio aéreo mediante la libre elección de ruta, lo que conlleva un menor consumo de combustible o una atenuación del ruido en zonas sensibles.
4. Facilita el proceso de aprobación operacional de los explotadores, proporcionando un conjunto limitado de especificaciones para la navegación.

Como se ha mencionado, dichos requisitos en se expresan en función de una precisión, integridad, disponibilidad, continuidad y funcionalidad determinada y se denominan especificaciones de navegación. Una especificación de navegación que, además de dicho contenido, incluya también un requisito de vigilancia y alerta a bordo se denomina especificación RPN. Mientras que una especificación que no incluya la vigilancia y alerta será una especificación RNAV.

Existen numerosos tipos de especificaciones tanto RNAV como RPN, en función de la fase de vuelo en la que se empleen como se muestra en el siguiente esquema.

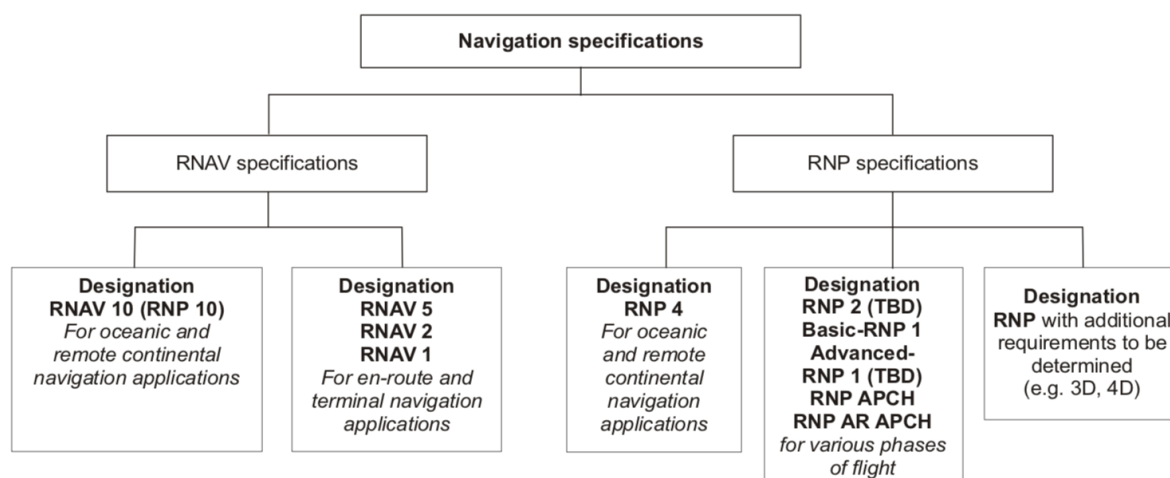


Figura 2-2. Tipos de especificaciones de navegación. Fuente: ICAO [4]

Como se observa, tanto dentro de las especificaciones RNAV como de las especificaciones RNP existen algunas en concreto empleadas para vuelos oceánicos o continentales remotos como la RNAV 10 o la RNP 4. En concreto, el número X que acompaña a la especificación (RNAV X o RNP X) hace referencia a la precisión de navegación lateral en millas náuticas que se espera se logre en, por lo menos, el 95% del tiempo total de vuelo.

### 2.1.2 Requisitos PBN para sistemas GNSS

A la hora de incluir los sistemas GNSS tanto en el posicionamiento como en el guiado de las operaciones de aeronaves, OACI establece unas especificaciones específicas. Dichas especificaciones se encuentran incluidas dentro de los SARPs publicados por OACI [4] y se muestran a continuación.



Tipo de Operación	Precisión Horizontal 95%	Precisión Vertical 95%	Integridad	Tiempo de alerta	Continuidad	Disponibilidad
En Ruta	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 \cdot 10^{-7}/h$	5 min	$1 \cdot 10^{-4}/h$ hasta $1 \cdot 10^{-8}/h$	0.99 hasta 0.99999
En ruta, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 \cdot 10^{-7}/h$	15 s	$1 \cdot 10^{-4}/h$ hasta $1 \cdot 10^{-8}/h$	0.99 hasta 0.99999
Aproximación inicial/intermedia, Aproximación de no Precisión, Salida	220 m (720 ft)	N/A	$1 \cdot 10^{-7}/h$	10 s	$1 \cdot 10^{-4}/h$ hasta $1 \cdot 10^{-8}/h$	0.99 hasta 0.99999
Aproximación de precisión con guía vertical (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 \cdot 10^{-7}/h$	10 s	$1 \cdot 10^{-6}$ cada 15 s	0.99 hasta 0.99999
Aproximación de precisión con guía vertical (APV-II)	16.0 m (52 ft)	8.0 m (26 ft)	$1 \cdot 10^{-7}/h$	6 s	$1 \cdot 10^{-6}$ cada 15 s	0.99 hasta 0.99999
Aproximación de precisión Categoría I	16.0 m (52 ft)	6.0 m hasta 4.0 m (20 ft to 13 ft)	$1 \cdot 10^{-7}/h$	6 s	$1 \cdot 10^{-6}$ cada 15 s	0.99 hasta 0.99999

Tabla 2–1. Especificaciones exigidas para sistemas de ayuda a la navegación según el tipo de operación.  
Fuente: OACI [4]

En cuanto a prestaciones reales de los sistemas GNSS se refiere, los valores generales más característicos, para el sistema GPS, se muestran igualmente a continuación.

Precisión Horizontal	Precisión Vertical	Integridad	Continuidad	Disponibilidad
15 m	9 m	$10^{-5}/h$	$>2 \cdot 10^{-4}/h$	$>99\%$

Tabla 2–2. Especificaciones de un sistema GNSS standard. Fuente: BEYOND [5]

Como se puede observar, en referencia a los aspectos de precisión, la tecnología GNSS actual permite cumplir los requisitos de precisión para operaciones en ruta, aproximación inicial, aproximación intermedia, aproximaciones de no precisión y aproximaciones de precisión con guía vertical. No obstante, para aproximaciones de precisión de categoría I, mayormente empleadas en aeropuertos comerciales, la precisión ofrecida por GNSS no es suficiente. Como se deduce, existen diferentes categorías de procedimientos de aproximación establecidas por OACI. A modo de ampliación, en el posterior apartado 2.4 se presentan cada una de ellas.

Así mismo, los sistemas GNSS no cumplen en ningún caso los requisitos de integridad exigidos por OACI. Esto supone un problema para la implementación de dichos sistemas GNSS. Precisamente se trata del principal motivo del desarrollo de los sistemas de aumentación GNSS existentes hoy en día, entre los que se encuentran GBAS, SBAS, ABAS y GRAS.

Debido al incumplimiento de los valores de prestaciones de los sistemas globales de navegación por satélite, aparecieron como solución los sistemas de aumentación. Estos sistemas tratan de aumentar las prestaciones ofrecidas por los GNSS de manera que cumplan con los requisitos mínimos exigidos por OACI. Creando nuevos sistemas de aumentación, es posible emplear la señal emitida por los sistemas GNSS para la navegación aérea cumpliendo con las especificaciones PBN. De esta forma, se pueden explotar todas las ventajas que ofrecen estos sistemas basados en constelaciones de satélites frente a los sistemas procedentes basados en las ayudas a la navegación convencionales.

# 3 GROUND BASED AUGMENTATION SYSTEM. GBAS

---

Tras analizar los requisitos exigidos por OACI de acuerdo con la instauración del concepto PBN, se llegó a la conclusión de que para emplear los sistemas de posicionamiento por satélite para procedimientos en los que se requiera una gran exactitud y seguridad, como las aproximaciones de precisión, es necesario el uso de sistemas de aumentación. En concreto, para procedimientos de aproximación de precisión de Categoría I, el sistema GBAS.

El sistema GBAS es uno de los sistemas de aumentación de señal GNSS reconocidos por OACI. Para ello emplea el concepto de correcciones diferenciales aumentando la señal generada por las constelaciones de satélites de manera que se puedan satisfacer los requisitos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad para la aviación civil establecidos por OACI.

Los procedimientos de aproximación de precisión que emplean el GBAS son comúnmente conocidos por la comunidad internacional como GLS o GBAS Landing Systems.

A lo largo de este capítulo se llevará a cabo todo el desarrollo en profundidad de éste nuevo sistema de ayuda a la aproximación, desde su arquitectura hasta el marco teórico de funcionamiento.

## 3.1 Descripción general

El sistema GBAS es uno de los sistemas de aumentación de señal GNSS reconocidos por OACI. Para ello emplea el concepto de correcciones diferenciales aumentando la señal generada por las constelaciones de satélites de manera que se puedan satisfacer los requisitos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad para la aviación civil establecidos por OACI.

Dichas correcciones diferenciales están basadas en tierra, de ahí su nombre “Ground-Based Augmentation System”, y son realizadas mediante una estación terrestre.

Las correcciones diferenciales consisten en lo siguiente:

Conocidas las coordenadas exactas de la posición de la estación terrestre, es posible obtener el error de posicionamiento de la señal emitida por los satélites mediante la comparación entre la posición real de la estación y la posición estimada mediante la señal GNSS. Calculada dicha diferencia, conocida como corrección, la estación terrestre emite una nueva señal VHF corregida hacia la aeronave. De este modo, la aeronave recibe una señal GNSS ya corregida mediante la cual el Flight Control Computer calcula la posición real de la aeronave.

Así mismo, la estación terrestre analiza en todo momento la integridad y continuidad de la señal GNSS, de manera que se eviten posibles errores o pérdidas de señal.

En la siguiente imagen se describe de forma esquemática el funcionamiento.

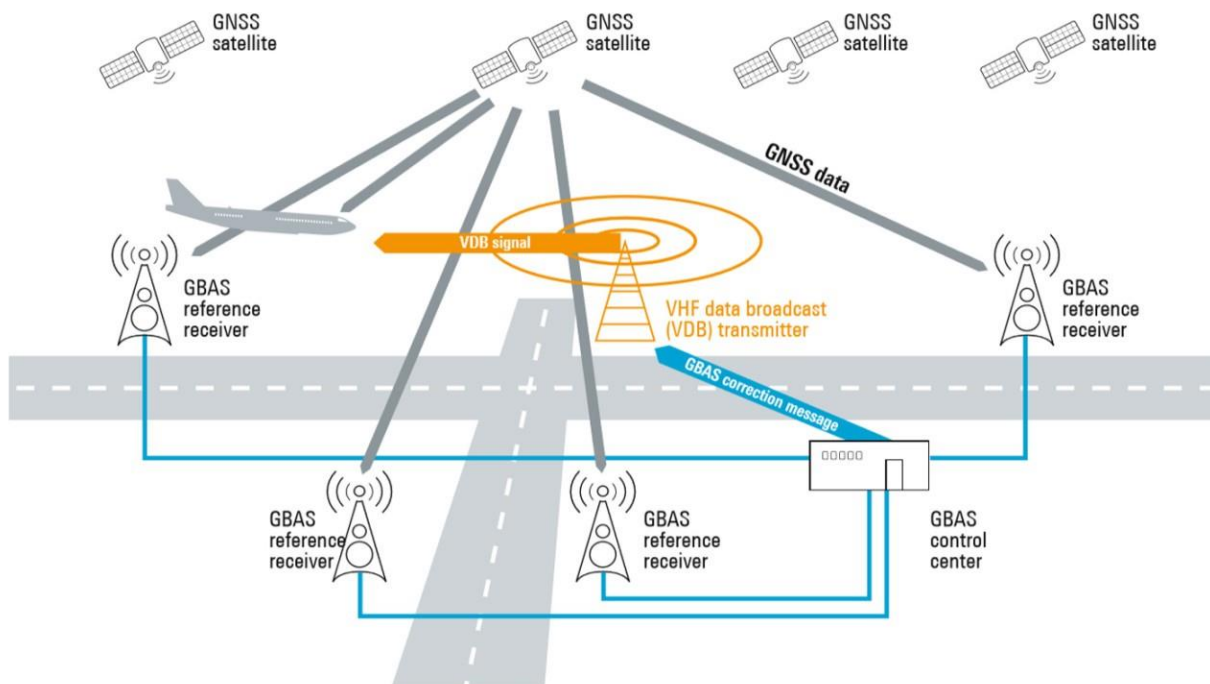


Figura 3-1. Esquema de funcionamiento de un GBAS

### 3.2 Arquitectura del Sistema

Para llevar a cabo su funcionamiento, el GBAS opera en base a tres segmentos claramente diferenciados, denominados de aquí en adelante subsistemas:

- Subsistema satélite, compuesto por la constelación de satélites GNSS.
- Subsistema terrestre, compuesto por la estación terrestre y las antenas asociadas.
- Subsistema aeronave, compuesto por el receptor de a bordo de la aeronave.

Como se puede apreciar en la siguiente ilustración, cada subsistema se encuentra conectado con el resto, de manera que se mantiene un flujo de información continuo entre ellos.

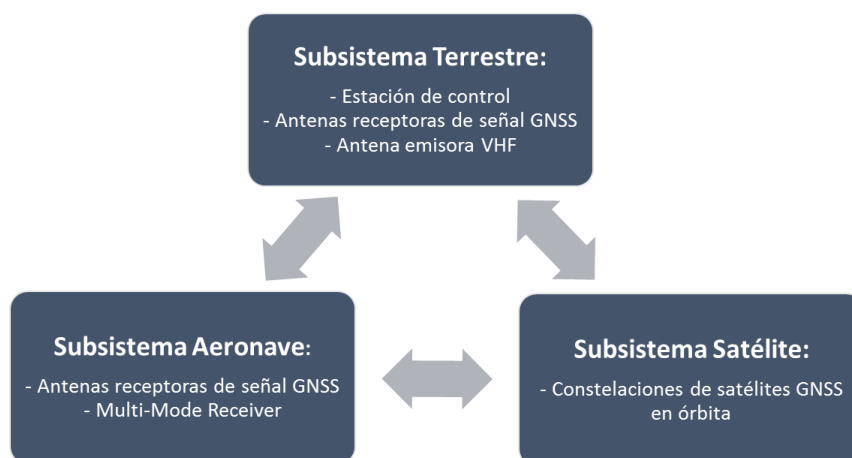


Figura 3-2. Subsistemas del GBAS

A continuación, se procede a describir cada uno de los tres subsistemas que componen el GBAS.

### 3.2.1 Subsistema satélite

El subsistema satélite está compuesto por las constelaciones de satélites, encargados de generar y emitir el mensaje de navegación GNSS. En la actualidad existen dos sistemas de posicionamiento por satélite adoptador por OACI dentro del concepto GNSS.

En primer lugar, el pionero GPS o Sistema de Posicionamiento Global, desarrollado por los Estados Unidos de América. Junto a este, el Sistema Orbital Mundial de Navegación por satélite o GLONASS, desarrollado por la Federación Rusa.

Así mismo, se encuentra el sistema GALILEO, desarrollado por la Unión Europea y el cual aún se encuentra en fase de desarrollo por lo que se prevé que sea añadido por OACI al conjunto de GNSS en los próximos años.

Junto al Galileo, se encuentran otros programas en desarrollo como el Beidou chino, el QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) nipón o el IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) indio.

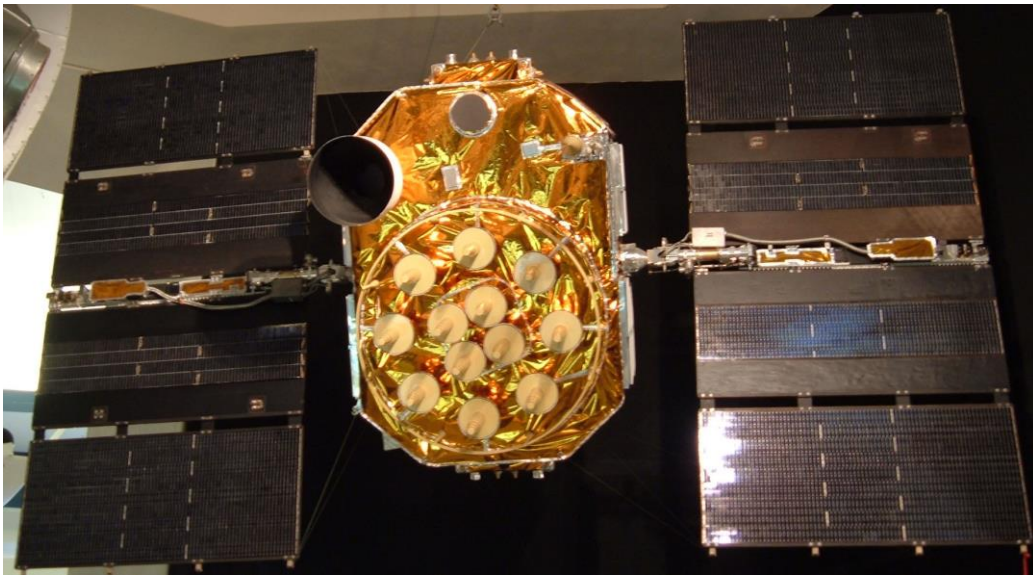


Figura 3-3. Satélite GPS

### 3.2.2 Subsistema aeronave

El subsistema de la aeronave engloba toda la aviónica embarcada necesaria para ejecutar el procedimiento de aproximación basada en la señal GBAS. Las principales funciones de este subsistema son:

1. Recibir y decodificar tanto las señales emitidas por los satélites GNSS como la señal VDB emitida por el GBAS.
2. Evaluar la disponibilidad del sistema para soportar la operación de vuelo en progreso.
3. Calcular y determinar en tiempo real la posición exacta de la aeronave.
4. Computar las desviaciones de la trayectoria de vuelo deseada, calculada como Segmento de Aproximación Final (FAS).
5. Proveer a la tripulación de las indicaciones de guiado para mantener la trayectoria del FAS y proporcionar información acerca de la integridad del sistema.

Para ello, dicho subsistema consta de varios componentes, los cuales se pueden distinguir en la siguiente imagen.

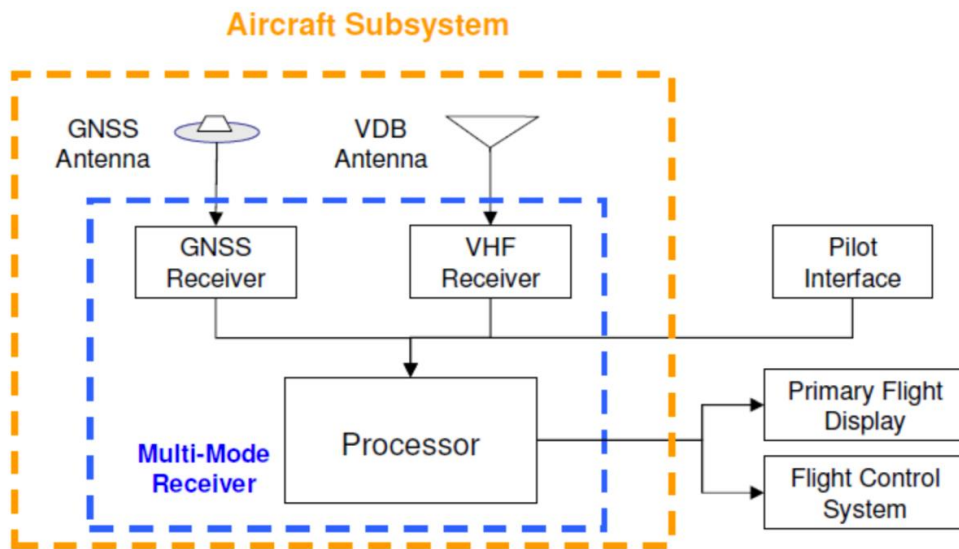


Figura 3-4. Esquema del subsistema aeronave GBAS

El subsistema está compuesto de:

- Una antena receptora de señal GNSS
- Una antena VDB
- Un sistema de recepción y procesamiento de la señal denominado “Multi-Mode Receiver” o MMR.

El sistema MMR permite implementar los diferentes tipos de aproximaciones de precisión que puedan coexistir en la actualidad, en concreto, para aproximaciones de precisión: ILS, MLS o GBAS.

Los estándares del GBAS han sido desarrollados para imitar, en términos de integración, el funcionamiento del ILS. De esta manera se pretende minimizar el impacto de la instalación del sistema GBAS dentro de la aviónica empleada hoy en día.

A la vista del piloto, el procedimiento y la información presentada es completamente similar al del ILS, por lo que no supone ninguna dificultad extra. A continuación, se muestran imágenes de la pantalla principal de vuelo siguiendo un procedimiento GLS y siguiendo un procedimiento ILS. Como se aprecia, las diferencias son mínimas y no supone ningún hándicap para el piloto.



Figura 3-5. Pantalla Principal de Vuelo. GLS (izquierda) vs ILS (derecha)

En línea con esta estrategia, y con el objetivo de no duplicar el hardware necesario durante la transición de ILS a GBAS, la industria ha desarrollado este tipo de Multi-Mode-Receiver.

El MMR soporta por tanto GBAS, SBAS, ILS o MLS. Es capaz de recibir las señales emitidas por la estación terrestre y realizar el procesamiento necesario para alimentar tanto al sistema de control de vuelo, como a la pantalla principal de vuelo de cualquier desviación con respecto al FAS basándose en la posición de la aeronave corregida diferencialmente. Así mismo, informará al piloto de la posición actual, velocidad y tiempo.

Para proporcionar al MMR del FAS correcto, el piloto selecciona el canal específico asociado a la señal que se corresponde con procedimiento que se va a seguir de entre los distintos procedimientos de aproximación que disponibles. En la siguiente imagen se puede apreciar el panel de selección de canal del MMR, denominado "Navigation Tuning Unit". Se aprecia como se puede seleccionar simultáneamente tanto el canal asociado al procedimiento GLS como otro canal asociado a un procedimiento ILS.



Figura 3-6. NAV Tuning Unit del Multi Mode Receiver

Para elevar los niveles de seguridad en cuanto a términos precisión, el MMR proporciona tres tipos de niveles de protección que determinan la precisión en el posicionamiento: Nivel de precisión horizontal (HPL), lateral (LPL) y vertical (VPL). De esta manera se consigue una estimación conservativa del error de posicionamiento.

En cuanto a la vigilancia de integridad, ésta se logra mediante una comparación constante, entre dichos niveles



de protección lateral/horizontal y vertical (HPL/LPL y VPL), derivados de la señal de aumentación y el límite de alerta para la actual fase de vuelo. Cuando se excede cualquiera de dichos niveles se envía una alerta al piloto.

### 3.2.3 Subsistema terrestre

El subsistema terrestre del GBAS está conformada por tres elementos principales.

- Una unidad de recepción de la señal (GBAS Reference Receivers)
- Una unidad central terrestre (GBAS Ground Facility)
- Una unidad de transmisión de la señal (VHF Data Broadcast)

En la siguiente imagen se muestra un esquema general del subsistema.

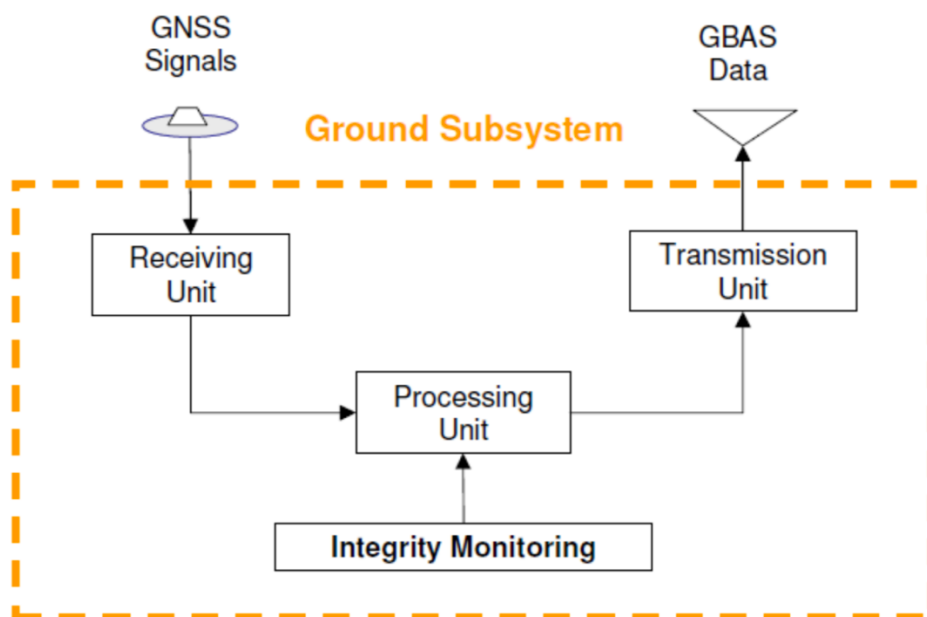


Figura 3-7. Esquema del subsistema aeronave GBAS

#### 3.2.3.1 Unidad de recepción

La unidad de recepción está formada por una serie de receptores de referencia a modo de antenas instaladas en puntos estratégicos dentro del recinto aeroportuario. A estos receptores o antenas se les denomina RRA o Reference Receiver Antenna.

El papel de dicha unidad es recolectar las señales de todos los satélites que se encuentren visibles. De cada uno de los receptores de referencia se conoce su posición precisa y las características del medio en el que se sitúa, de manera que posteriormente se puedan realizar las oportunas correcciones.

La típica instalación GBAS posee cuatro antenas RRA, las cuales se encuentran permanentemente recibiendo la señal GNSS emitida por la constelación de satélites del subsistema satélite. Mediante cableado subterráneo, dichas antenas transmiten la información recibida a la unidad central terrestre, la cual se encarga de procesar la señal y realizar los cálculos oportunos para llevar a cabo la multilateración y determinar la posición GNSS de las antenas.





Figura 3-8. GBAS Reference Receiver Antenna (RRA). Fuente: Melbourne Airport.

### 3.2.3.2 Unidad central terrestre

La información captada en las antenas de los receptores es enviada a la unidad central. En dicha instalación central se calculan las correcciones para cada satélite de navegación que se encuentre visible y transmite estas correcciones diferenciales junto a otra serie de parámetros de integridad y trayectoria de aproximación.

Para ello, la instalación central está compuesta por una unidad central de procesamiento o “Processing Unit” y una unidad de monitorización de la integridad o “Integrity Monitoring”.

De este modo, el subsistema tierra puede monitorizar todas las fuentes de señales GNSS y proveer al usuario con:

- Correcciones de posición y hora de referencia
- Monitorización e información de la integridad
- Datos del segmento de aproximación final (FAS)

El proceso seguido es el siguiente:

1. La unidad central terrestre calcula las correcciones de posición de cada uno de los satélites de los que recibe señal.
2. Para llevar a cabo la monitorización de la integridad, una vez calculadas las correcciones, evalúa y compara constantemente cada una de ellas con el resto para detectar algún tipo de error o discrepancia en alguno de los satélites. En el caso de que detecte que un satélite está emitiendo una señal degradada automáticamente descarta la información proporcionada por el mismo. De esta manera, es posible conseguir altos niveles de integridad en el sistema.
3. Tras haber obtenido las correcciones y comprobado la integridad de la señal de todos los satélites, la unidad central terrestre calcula una corrección media que será la empleada.
4. Junto a esta información, la unidad de procesamiento genera diversas señales, cada una de las cuales se corresponde con los datos de un FAS en concreto, dentro de los procedimientos de aproximación disponibles en el aeropuerto.

5. Tras todo el procesamiento de la señal, esta es enviada a la unidad de transmisión, la cual la emitirá hacia la aeronave.

Físicamente, la unidad de procesamiento es una caseta en la cual se ubican los sistemas de procesamiento de la señal. A continuación, se muestra una imagen de la misma.



Figura 3-9. Caseta de unidad de procesamiento GBAS. Fuente: Aeropuerto de Frankfurt



Figura 3-10. Unidad de procesamiento Honeywell SLS-4000.

### 3.2.3.3 Unidad de transmisión

La emisión de los datos es llevada a cabo empleando un VDB o bien “VHF Data Broadcast”. De este modo, la señal es transmitida en la banda VHF (Very High Frequency), la cual ocupa el rango de frecuencias entre 108 MHz y 117.975 MHz, con una separación entre canales de 25 kHz.

La antena VDB se ubica de forma que exista una línea de visión directa con cualquier punto dentro del volumen de cobertura donde se pretenda servir a la aproximación. La cobertura de las transmisiones VDB por GBAS debe ser omnidireccional y debe tener un alcance de al menos 23 NM. El mensaje VDB es enviado mediante las antenas a una frecuencia de dos veces por segundo siendo posible guiar hasta 48 aproximaciones simultáneamente.

Cada aproximación GBAS es transmitida desde la unidad de transmisión y está asociada a un número de canal específico en el rango de 20001 a 39999. El número de canal permite que el subsistema de abordaje GBAS sintonice la frecuencia correcta y seleccione el bloque de datos del tramo de aproximación final (FAS) que define la trayectoria de la aproximación deseada.

A modo de ilustración, se muestran a continuación una fotografía de la antena de transmisión VDB del GBAS tomada en el Aeropuerto de Málaga.



Figura 3-11. Mástil y antena VDB de la unidad de procesamiento. Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol

### 3.3 Características de la señal GBAS

Como se ha mencionado anteriormente, la señal GBAS es emitida por el subsistema terrestre hacia la aeronave empleando un Very High Frequency Digital Broadcast, conocido como VDB.

A diferencia del ILS, el cual emite una señal radioeléctrica analógica, empleando el criterio de “Difference in Depth of Modulation”, el GBAS se comunica con los sistemas de a bordo de la aeronave mediante un enlace de datos digital emitidos en la banda de frecuencia VHF, la cual se extiende desde 108 hasta 117.975 MHz con una separación entre canales de 25 kHz.

Cada aproximación GBAS transmitida desde el subsistema de tierra está asociada a un número de canal en la gama de 20001 a 39999. Para sintonizar con el canal correspondiente, el piloto introduce manualmente dicho valor de canal en la interfaz del MMR. En consecuencia, cada canal proporciona un mensaje VDB diferente.

#### 3.3.1 Estructura del mensaje digital

El mensaje de radiodifusión de datos VHF (VDB) contiene diferentes tipos o “paquetes” de información cada uno diferenciado por un identificador. Todos ellos se clasifican según la siguiente tabla.

Identificador de tipo	Contenido del mensaje
0	Espacio extra
1	Correcciones diferenciales GBAS
2	Datos relacionados con GBAS
3	Reservado para la unidad de transmisión terrestre
4	Datos del Segmento final de Aproximación (FAS)
5	Disponibilidad de la unidad de transmisión terrestre
6	Reservado
7	Reservado para aplicaciones nacionales
8	Reservado para pruebas
9-255	Espacio extra

Tabla 3–1. Estructura del mensaje digital VDB transmitido por el GBAS

Dentro de todos ellos, los mensajes más significativos son los de tipo 1, tipo 2 y tipo 4, los cuales se detallan a continuación.

- Bloque de tipo 1: El mensaje de tipo 1 proporciona los datos de corrección diferencias para cada uno de los satélites GNSS. El mensaje consta de tres secciones:
  - Información del mensaje: hora de validez, bandera adicional de mensaje, número de mediciones, etc.
  - Información de baja frecuencia: parámetro de descorrelación de efemérides, información de disponibilidad de satélites, etc.
  - Bloques de medición de datos de satélite: Corrección diferencial de pseudodistancia (PRC), Corrección de Tasa de Alcance (RRC).
- Bloque de tipo 2: El mensaje de tipo 2 identifica el emplazamiento del punto de referencia GBAS al que se aplican las correcciones proporcionadas por el GBAS y proporciona otros datos relacionados con el GBAS.
- Bloque de tipo 4: El mensaje de tipo 4 contiene uno o más bloques de datos del Tramo de Aproximación Final (FAS), cada uno definiendo una sola aproximación de precisión. Cada conjunto de datos de mensaje de tipo 4 incluye lo siguiente:
  - Longitud del conjunto de datos: Indica el número de bits empleados en cada bloque.
  - Bloque de datos FAS que definen la trayectoria de aproximación asociada.
  - Estado de aproximación FAS-VAL (FAS Vertical Alert Limit)
  - Estado de aproximación FAS-LAL (FAS Lateral Alert Limit)

Del conjunto de bloques que se transmiten dentro del mensaje, el más relevante se corresponde con el bloque de datos FAS o “Final Approach Segment” contenido en el bloque de tipo 4. Dicho bloque está formado por una

serie de parámetros que definen el segmento de aproximación final. A continuación, se profundiza en dicho bloque, exponiendo la estructura del mismo.

### 3.3.1.1 Bloque de datos FAS

Como se ha mencionado, el GBAS define la trayectoria de aproximación final (FAS) mediante un conjunto de parámetros incluidos dentro del bloque de tipo 4 del mensaje de datos digital. Para cada aproximación GBAS existirá un único conjunto de parámetros FAS. Tal y como se describe en el Anexo 10, Vol 1 de OACI [4], dicho bloque de datos FAS posee la siguiente estructura.

Parámetro	Nº de bits empleados	Rango de posibles valores	Resolución
Tipo de operación	4	0 a 15	1
ID de aeropuerto	32	-	-
Número designador de pista	6	1 a 36	-
Letra designadora de pista	2	-	-
Designador de aproximación	3	0 a 7	1
Indicador de ruta	5	-	-
Selector de FAS	8	0 a 48	1
Identificador de FAS	32	-	-
Latitud del LTP	32	$\pm 90.0^\circ$	0.0005 arcsec
Longitud del LTP	32	$\pm 180.0^\circ$	0.0005 arcsec
Altura del LTP	16	-512.0 a 6041.5 m	0.1 m
$\Delta$ Latitud del FPAP	24	$\pm 1.0^\circ$	0.0005 arcsec
$\Delta$ Longitud del FPAP	24	$\pm 1.0^\circ$	0.0005 arcsec
TCH	15	0 a 638.35 m ó 0 a 3276.7 ft	0.05 m ó 0.1 ft
Indicador de unidades del TCH	1	-	-
Ángulo de senda de planeo (GPA)	16	0 a $90.0^\circ$	$0.01^\circ$
Anchura del rumbo	8	80 a 143.75 m	0.25 m
Desplazamiento de longitud	8	0 a 2032 m	8 m
CRC del FAS	32	-	-

Tabla 3–2. Estructura del bloque Final Approach Segment (FAS)

A continuación, se describe brevemente el propósito de que aporta cada parámetro.

- Tipo de operación: indica si se trata de una aproximación directa u otro tipo de aproximación
  - Codificación:
    - 0 = procedimiento de aproximación directa
    - 1 a 15 = extra
- ID de aeropuerto: se corresponde con el código de 3 o letras utilizado para designar al aeropuerto
- Número designador de pista: número correspondiente al identificador de la pista en la que se realiza la aproximación.
  - Codificación:
    - 0 = helipuerto
    - 1 a 36 = número de pista
- Letra designadora de pista: letra correspondiente al identificador de la pista en la que se realiza la aproximación en el caso de pistas paralelas.
  - Codificación:
    - 0 = sin letra
    - 1 = R (derecha)
    - 2 = C (centro)
    - 3 = L (izquierda)
- Designador de aproximación: parámetro que determina la categoría de aproximación de precisión.
  - Codificación:
    - 0 = Aproximación de precisión con guía vertical (APV)
    - 1 = CAT I
    - 2 = CAT II
    - 3 = CAT III
    - 4 a 7 = extra
- Indicador de ruta: identificador de una letra empleado para distinguir entre aproximaciones múltiples a un mismo extremo de pista.
- Selector del FAS: identificador numérico utilizado para seleccionar al bloque de datos FAS (aproximación deseada).
- Identificador de FAS: conjunto de tres o cuatro caracteres alfanuméricos empleados para designar inequívocamente la trayectoria de referencia.
- Latitud del LTP: latitud del punto LTP en segundos de arco
  - Codificación:
    - Valor positivo denota latitud norte
    - Valor negativo denota latitud sur
- Longitud de LTP: longitud del punto LTP en segundos de arco
  - Codificación:
    - Valor positivo denota latitud norte
    - Valor negativo denota latitud sur
- Altura del LTP: altura del LTP por encima del elipsoide WGS-84
- Incremento de latitud del FPAP: diferencia en términos de latitud en segundos de arco entre el FPAP de la pista y el LTP.
  - Codificación:

- Valor positivo denota que la longitud del FPAP está al este de la latitud del LTP.
  - Valor negativo denota que la longitud del FPAP está al oeste de la latitud del LTP.
- Incremento de longitud del FPAP: diferencia en términos de longitud en segundos de arco entre el FPAP de la pista y el LTP.
  - Codificación:
    - Valor positivo denota que la longitud del FPAP está al este de la longitud del LTP.
    - Valor negativo denota que la longitud del FPAP está al oeste de la longitud del LTP.
- TCH: altura de la senda de planeo por encima del LTP definido en unidades de pies o metros.
- Indicador de unidades del TCH: determina las unidades empleadas para definir el TCH
  - Codificación:
    - 0 = pies
    - 1 = metros
- GPA: ángulo de la trayectoria de aproximación (senda de planeo) respecto al plano horizontal tangente al elipsoide WGS-84 en el LTP.
- Anchura de rumbo: desplazamiento lateral en metros respecto a la trayectoria definida por el FAS en el LTP a la cual se obtiene la deflexión de escala completa de un indicador de desviación de rumbo.
- Desplazamiento de longitud: distancia desde FAP hasta el extremo de pista.
- CRC: conjunto de 32 bits que se adjunta al extremo de cada bloque de datos FAS para asegurar la integridad del mensaje.

Los parámetros empleados para determinar geoméricamente la trayectoria de aproximación final (FPAP, LTP, GPA, etc.) se describen en el siguiente apartado.

### 3.3.2 Definición de la trayectoria de aproximación final

Mediante la sintonización del canal correspondiente, el sistema de a bordo de la aeronave recibe el bloque de datos correspondiente a la trayectoria final de aproximación. Dicha trayectoria de aproximación, como se ha comentado, se denomina Final Approach Segment o bien FAS y consiste en una línea generalmente recta en el espacio definida geoméricamente por los siguientes parámetros.

- **Punto de umbral de aterrizaje (LTP):** El LTP es un punto ficticio el cual se sitúa habitualmente en el punto medio del umbral de la pista. No obstante, en ocasiones excepcionales es posible encontrarlo fuera del umbral físico de la misma.
- **Punto de alineación de la trayectoria de vuelo (FPAP):** El FPAP es un punto empleado, como su propio nombre indica, para alinear la trayectoria de aproximación final. Éste se sitúa a lo largo del eje de pista en el extremo de parada de la pista o más allá.
- **Altura de cruce del umbral (TCH):** La TCH consiste en un valor de altura al que la trayectoria se encuentra al cruzar el punto de umbral de aterrizaje LTP.
- **Punto de cruce de referencia (DCP):** Queda definido por un punto ficticio que se encuentra a una altura TCH por encima del LTP. Se trata del punto de la trayectoria en el que se cruza el umbral de pista.
- **Ángulo de trayectoria de planeo (GPA):** Define el ángulo, medido respecto al plano horizontal local, con el que la trayectoria FAS desciende.

- **Punto de intersección de la trayectoria de planeo (GPIP):** Punto en el que la trayectoria de aproximación final intercepta el plano horizontal local. El GPIP puede estar por encima o por debajo de la superficie de pista dependiente de la curvatura de la misma.
- **Punto de referencia de azimut GBAS:** Punto situado más allá del FPAP a lo largo del eje de pista, a una distancia de separación fija de 305 m (1000 ft).

Como se desarrolló en el Apartado 3.3.1.1, estos parámetros vienen determinados dentro de un bloque de datos FAS transmitido en el mensaje de tipo 4 o bien se pueden encontrar almacenados en la base de datos de a bordo.

Son empleados para realizar los cálculos de orientación y desviaciones tanto laterales como verticales que se calculan de manera continua durante el transcurso de la aproximación final. Se definen a continuación:

- **Orientación lateral:** La referencia lateral del FAS queda definida mediante un plano vertical que pasa por el punto de umbral de aterrizaje (LTP) y el punto de alineación de la trayectoria de vuelo (FPAP).
- **Orientación vertical:** Para definir la orientación vertical se hace uso del plano horizontal local. Éste queda definido como un plano perpendicular a la vertical local que pasa por el LTP. Dicha vertical local se define como la normal al elipsoide de referencia WGS-84 en el punto LTP. Una vez definido el plano horizontal, la orientación vertical se mide respecto a un plano oblicuo que forma un ángulo GPA con respecto al plano horizontal local y pasa por el DCP.

En la siguiente imagen se representa un tramo de aproximación final (FAS) estándar.

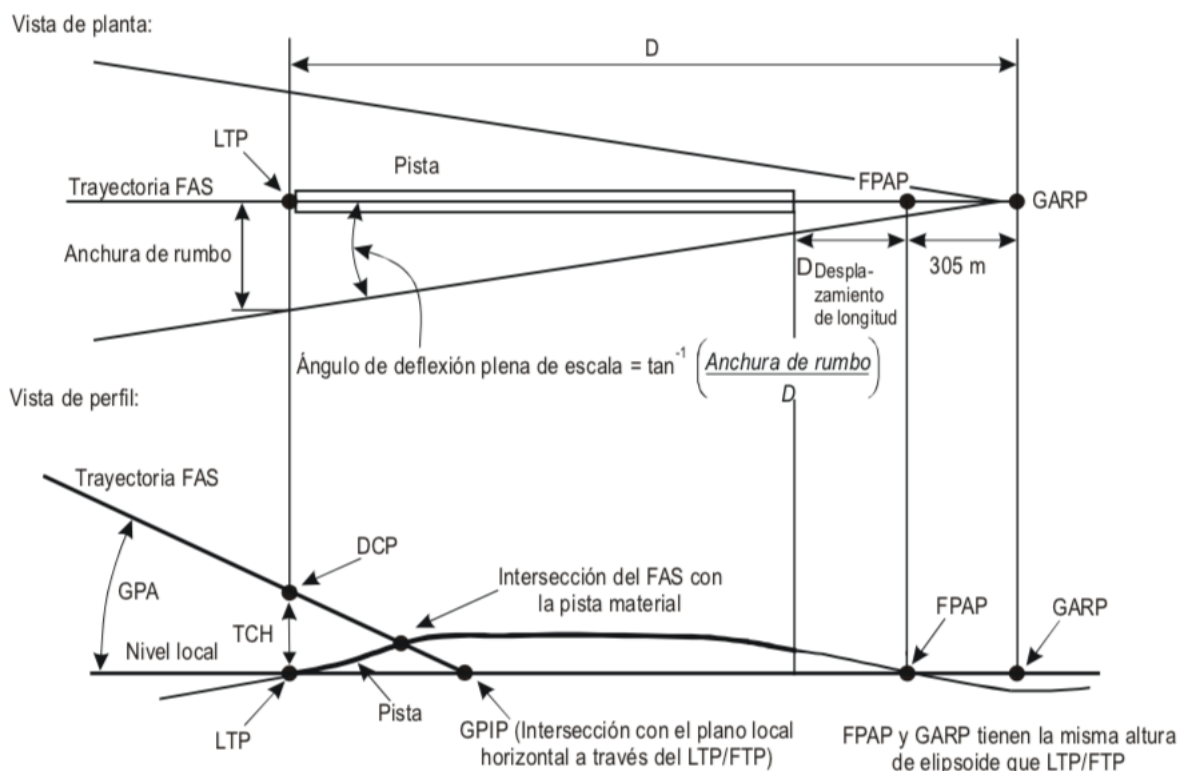


Figura 3-12. Definición del segmento de aproximación final (FAS). Fuente: OACI [4]

### 3.3.3 Cobertura de la señal

OACI establece en su Anexo 10 [4], apartado 3.7.3.5.3.1 un rango de cobertura mínimo que debe cubrir la señal



VDB radiodifundida para dar servicio a aproximaciones de precisión.

Se establece lo siguiente:

*La cobertura del GBAS en apoyo de cada una de las aproximaciones de precisión de Categoría I o aproximaciones con guía vertical será como sigue, excepto cuando lo dicten de otro modo las características topográficas y lo permitan los requisitos operacionales:*

*a) lateralmente, empezando a 140 m (450 ft) a cada lado del punto del umbral de aterrizaje/punto de umbral ficticio (LTP/FTP) y prolongando a  $\pm 35^\circ$  a ambos lados de la trayectoria de aproximación final hasta 28 km (15 NM) y  $\pm 10^\circ$  a ambos lados de la trayectoria de aproximación final hasta 37 km (20 NM); y*

*b) verticalmente, dentro de la región lateral, hasta el mayor de los siguientes valores  $7^\circ$  o  $1,75\theta$  por el ángulo de trayectoria de planeo promulgado (GPA) por encima de la horizontal con origen en el punto de interceptación de la trayectoria de planeo (GPIP) y  $0,45\theta$  GPA por encima de la horizontal o a un ángulo inferior, descendiendo hasta  $0,30\theta$  GPA, de ser necesario, para salvaguardar el procedimiento promulgado de interceptación de trayectoria de planeo. Esta cobertura se aplica entre 30 m (100 ft) y 3 000 m (10 000 ft) de altura por encima del umbral (HAT).*

Dicha de cobertura área se extiende desde el punto de intersección de la trayectoria de planeo con la pista y se muestran en la siguiente imagen.

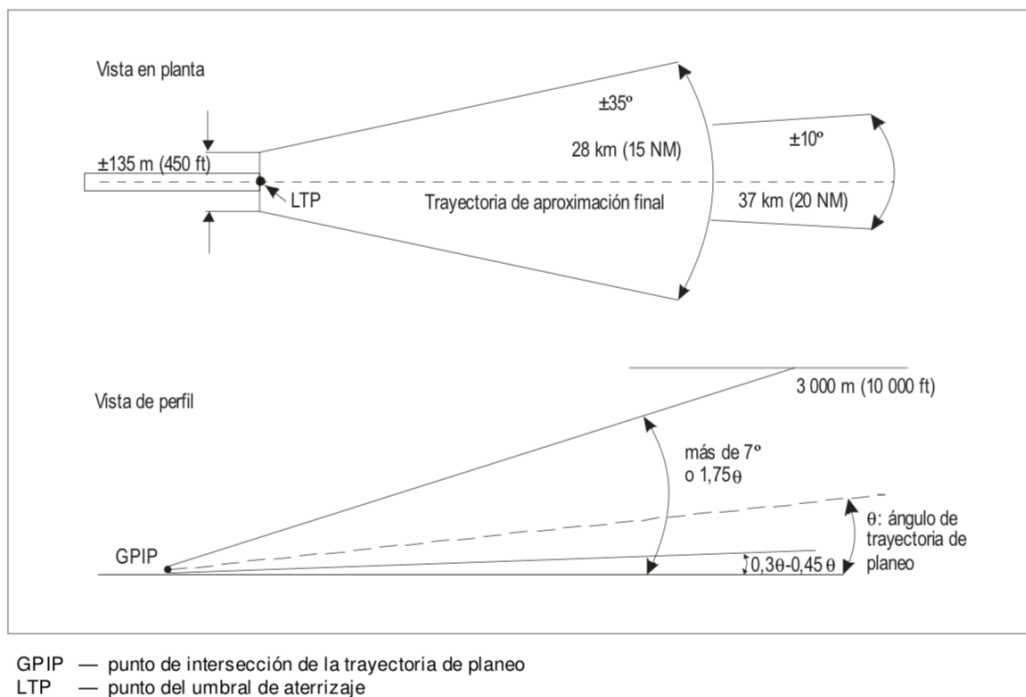


Figura 3-13. Área de cobertura mínima GBAS. Fuente: OACI [4]

La cobertura requerida para prestar apoyo al servicio de determinación de la posición GBAS fuera del volumen de cobertura de la aproximación de precisión viene determinado por un parámetro denominado “Distancia de uso máxima” o  $D_{\max}$  definido dentro del mensaje de tipo 2. Dicha distancia define el área dentro de la cual la integridad requerida está asegurada y las correcciones diferenciales pueden utilizarse para el servicio de determinación de la posición.

### 3.4 Aplicaciones del GBAS. Categorías de aproximación de precisión

El GBAS posee el potencial necesario para brindar una aumentación que permita la aproximación de precisión. Dicho tipo de aproximaciones de precisión se dividen en varias categorías. Así mismo, existen procedimientos

menos restrictivos denominados aproximaciones de no precisión. Estas categorías de aproximación de precisión dependen de dos parámetros: la altura de decisión (DH) y el alcance visual en pista (RVR). Para una mayor comprensión se definen ambos conceptos.

- **Altura de decisión (DH):** Se define como la altura especificada en la aproximación de precisión a la cual debe iniciarse una maniobra de aproximación frustrada si el piloto no ha establecido contacto visual con la pista.
- **Alcance visual en pista (RVR):** Distancia hasta la cual el piloto de una aeronave que se encuentra sobre el eje de pista puede ver las señales de superficie de pista o las luces que delimitan su eje.

De acuerdo a estos dos parámetros, los tipos de categorías de aproximaciones de precisión son los siguientes.

Categoría de aproximación de precisión	Altura de decisión (m)	Alcance visual en pista (m)
CAT I	$\geq 60$	$\geq 550$
CAT II	$60 > DH \geq 30$	$\geq 350$
CAT III-A	$< 30$	$\geq 220$
CAT III-B	$< 15$	$200 > RVR \geq 50$
CAT III-C	Sin mínimos	Sin mínimos

Tabla 3-3. Categorías de aproximación de precisión

El sistema GBAS está capacitado para brindar aumentación a las constelaciones principales y proporcionar ayuda a la aproximación para procedimientos de hasta categoría III.

A pesar de ello, a día de hoy, el sistema GBAS únicamente está certificado para realizar procedimientos de aproximación de precisión CAT I, estando instaurado en Europa en 4 aeropuertos civiles (Málaga, Bremen, Zúrich y Frankfurt). No obstante, la aplicación del sistema para Categorías II y III se encuentra en fase de desarrollo y validación y por lo tanto se espera que a partir de 2020 pueda estar en funcionamiento.

### 3.5 Ventajas del GBAS

A día de hoy, el sistema europeo de gestión del tráfico aéreo (ATM) da soporte a un total de aproximadamente 26000 vuelos diarios. Los pronósticos indican que dicha cifra probablemente se verá doblada durante la década del 2020.

En base a este horizonte de crecimiento la Comisión Europea implantó en 1999 el Single European Sky (SES). Una iniciativa que pretende modernizar y armonizar el espacio aéreo europeo para dar cabida a tan importante crecimiento aéreo bajo unos niveles de seguridad requeridos. Para ello, se ha fundado una red de investigación denominada SESAR, es encargada de proporcionar las tecnologías y procedimientos avanzados con miras a modernizar y optimizar la futura red aérea europea.

Entre numerosos desarrollos que se llevan a cabo en el SESAR se encuentra éste nuevo sistema de posicionamiento por satélite, el GBAS. El principal objetivo del sistema es sustituir, de manera armónica y progresiva al sistema de aproximación ILS, en el cual se confía desde los años 60. De esta manera, aumentar la capacidad en los aeropuertos en consecuencia disminuir los retrasos y la propagación de los mismos dentro de la red aérea.

### 3.5.1 GBAS frente a ILS

El sistema Instrumental Landing System, conocido como ILS, ha proveído a los usuarios del sistema aéreo de excelentes resultados en procedimientos de aproximación de precisión a pista. No obstante, éste posee ciertos problemas que el sistema GBAS soluciona, los cuales se enumeran a continuación.

#### 1. Menor necesidad de zonas de protección de señal

Las señales emitidas por el sistema ILS son susceptibles a ciertos obstáculos dentro del área del aeropuerto. En consecuencia, ciertas áreas dentro del aeropuerto, incluyendo el lado aire, deben ser protegidas. Estas se denominan áreas críticas de ILS. Este hecho genera un impacto negativo en cuanto al rendimiento del aeropuerto en general y de la pista en concreto.

La señal emitida por el sistema GBAS no requiere de este tipo de protecciones, dado que la estación terrestre emite omnidireccionalmente y es posible ubicarla en una posición estratégica para ello. De este modo se minimizan las áreas críticas lo que se traduce en menores restricciones en el movimiento de las aeronaves durante las fases de rodaje dentro del aeropuerto, aumentando así el rendimiento del mismo.

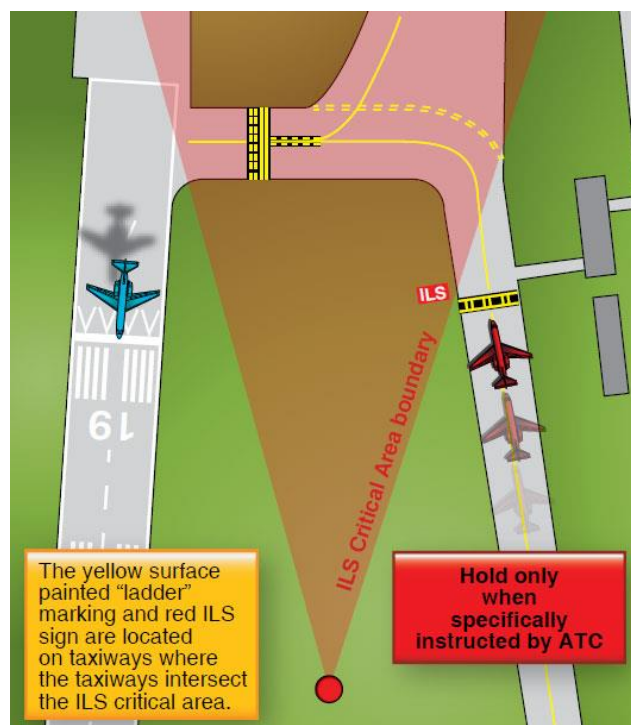


Figura 3-14. Área crítica del ILS

#### 2. Menor cantidad de recursos e infraestructura necesaria

El uso del sistema ILS requiere la instalación de una estación terrestre, en concreto un array de antenas, no solo para cada pista a la que se quiera dotar de aproximación de precisión, sino también para cada cabecera. Esto genera dos grandes desventajas.

En primer lugar, se requiere una infraestructura más compleja aumentando los costes tanto de instalación como de mantenimiento. Así mismo, se consumen mayores recursos de la banda de frecuencia de funcionamiento (VHF), dado que cada ILS debe emitir una señal independiente.

A diferencia del ILS, sistema GBAS solo requiere de una estación terrestre para atender hasta 48 procedimientos de aproximación individuales, independientemente de la pista a la que se aproximen. Esto se traduce en una enorme reducción no solo cuanto a costes sino también en cuanto a recursos radioeléctricos.

#### 3. Mayor flexibilidad en las trayectorias de aproximación a pista

La señal de radioayuda emitida por el ILS es una señal direccional, la cual determina una única senda de planeo

hacia la pista. De este modo, solo es posible realizar aproximaciones de precisión cuyo segmento final de aproximación sea recto, de pendiente fija y hasta un punto de tocada en pista fijo.

Esto limita evidentemente la flexibilidad a la hora de proyectar los procedimientos de aproximación. El sistema GBAS posee la funcionalidad de modificar la trayectoria final de aproximación permitiendo así trayectorias de aproximación final desde diferentes ángulos y direcciones, de pendiente variable. Así es posible modificar el punto de tocada de pista e incluso realizar aproximaciones curvas.

De esta forma se consigue aumentar la flexibilidad en las aproximaciones aéreas reduciendo el impacto acústico en áreas vulnerables y aumentando el rendimiento.

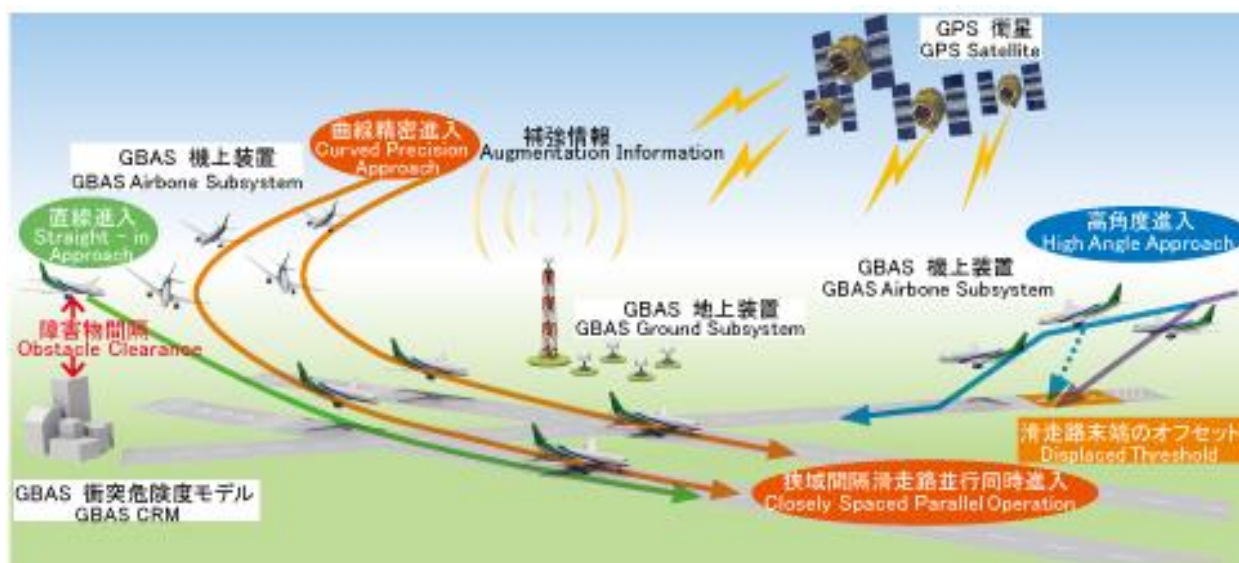


Figura 3-15. Diferentes tipos de aproximaciones mediante GBAS

Es más. Se pretende que, en un futuro, el desarrollo del sistema GBAS no solo permita guiar a las aeronaves durante las aproximaciones a pista, sino también dentro del área de rodaje del aeropuerto de manera que la aeronave tenga en todo momento conciencia acerca de su posición dentro de las calles de rodaje y la plataforma.

Esto conllevará una reducción en la carga de trabajo de los controladores de aeródromo, una mayor eficiencia en el movimiento en tierra de las aeronaves y un mayor aporte en materia de seguridad.

### 3.5.2 Beneficios del GBAS

En definitiva, el GBAS presenta grandes ventajas y beneficios tanto para los usuarios como para el aeropuerto en términos de eficiencia y capacidad. Estos se resumen en:

#### 1. Capacidad

El GBAS permitirá llevar a cabo complejos procedimientos de aproximación dentro del área terminal del aeropuerto los cuales permitirán aumentar la densidad de operaciones sin afectar a la seguridad traduciéndose en un aumento de la capacidad.

#### 2. Flexibilidad

Los beneficios en materia cuanto a flexibilidad incluyen una reducción de la carga de trabajo de los controladores, reduciendo la necesidad de comunicación.

Una reducción en el tiempo de aproximación a pista, empleando aproximaciones más flexibles y eficientes, traduciéndose en un ahorro de combustible y una reducción de los costes para los operadores.

#### 3. Beneficios para el operador aéreo

Los procedimientos de aproximación se transmiten mediante enlace radioeléctrico desde tierra hasta la aeronave,

reduciendo la necesidad de una gran base de datos a bordo del avión.

La tripulación de abordaje puede poseer de información precisa acerca de la ubicación de la aeronave a lo largo de la aproximación, así como del tiempo de llegada a los diferentes puntos de referencia de la misma logrando así un aterrizaje automatizado y seguro.

#### **4. Beneficios para el aeropuerto y la comunidad**

El consiguiente aumento de la capacidad en los aeropuertos a consecuencia de la evolución a procedimientos GBAS permitirá a los pasajeros sufrir un menor número de retrasos aumentando la puntualidad de los vuelos especialmente en aeropuertos de alta congestión aérea. Igualmente, la generación de ruido en aeropuertos cercanos a zonas habitadas o protegidas sigue siendo un problema actual.

Una navegación más precisa dentro del área terminal del aeródromo conseguida mediante GBAS brinda la oportunidad de reducir en gran medida el impacto del ruido generado por las aeronaves. A través de la flexibilidad que ofrece el GBAS para construir procedimientos de aproximación complejos y flexibles disponibles para cualquier condición climática, se pueden generar aproximaciones que eviten las zonas sensibles disminuyendo los niveles de ruido y contaminación en dichas áreas.

### **3.6 GBAS en la actualidad**

A día de hoy, el GBAS es, más que un prototipo de sistema, una realidad. Dentro del espacio aéreo europeo son 4 los aeropuertos que lo implementan para uso civil: Málaga, Bremen, Zúrich y Frankfurt), sirviendo en todos como ayuda la aproximación de Categoría I.

Así mismo, existe un gran número de aeropuertos alrededor del mundo que ya lo implementan para el mismo tipo de categorías. Entre los más significativos se encuentran Sydney, Houston o Melbourne.

Como se mencionó anteriormente, gracias a los avances en la tecnología empleada en la gestión del tráfico aéreo, promovidos en gran parte por la iniciativa SES y el programa SESAR europeos, existen un gran número de aeropuertos que se encuentran bajo estudio, investigación e incluso empleando actualmente prototipos, no solo para aproximaciones de Categoría I sino para aproximaciones de mayor precisión como Categoría II y Categoría III. Para dichas funcionalidades se espera que, dentro del marco común aéreo europeo, el GBAS se encuentre totalmente validado y en funcionamiento para dichos niveles de precisión a inicios de la próxima década del 2020.

Con el objetivo de aportar una visión general del avance actual del GBAS se muestra a continuación un mapamundi con todos los aeropuertos que ya incorporen, posean proyectos activos para su incorporación o bien se encuentren bajo estudio e investigación para la futura implantación del GBAS.



Figura 3-16. Aeropuertos con GBAS alrededor del mundo. Fuente: flygls.net

En distintas tonalidades de verde se encuentran todos los sistemas GBAS que se encuentran actualmente en funcionamiento. Se trata de sistemas de Categoría I. Estos pueden ser sistemas GBAS CAT-I certificados por OACI como sistemas que pueden proporcionar ayuda a la aproximación en aeródromos públicos cumpliendo con los mínimos requeridos de aproximaciones de precisión de Categoría I.

Así mismo, se encuentran instalaciones del mismo tipo, totalmente certificados, pero de carácter privado y por lo tanto operativos para usuarios autorizados.

En Azul se pueden encontrar los aeropuertos en los que se encuentran ya implementados prototipos de GBAS para categorías CAT-II y CAT-III con el objetivo de llevar a cabo las tareas de validación y certificación. En amarillo se encuentran los aeropuertos bajo los cuales se está llevando a cabo una actual implantación del GBAS CAT-I.

El color blanco se corresponde con los aeropuertos que se encuentran bajo estudio sobre una posible instalación del GBAS en un futuro cercano. Cabe resaltar que uno de estos aeropuertos que se encuentran en esta categoría es el Aeropuerto de Gran Canaria, sobre el cual versa este proyecto.

Por último, en rojo se muestran las instalaciones GBAS empleadas a día de hoy para cuestiones de investigación y desarrollo del sistema.

En el Anexo I: Listado de estaciones GBAS en el mundo es posible encontrar enumerados, en formato tabulado, todas las estaciones GBAS mostrados en la imagen superior.

## 4 MARCO TEÓRICO

Una vez analizada la infraestructura y el funcionamiento del GBAS se continúa con el marco teórico de este proyecto. En él se procederá a exponer todo el desarrollo matemático que trasciende del funcionamiento del sistema.

En primer lugar, se desarrollarán las bases de dicho posicionamiento diferencial mediante GNSS, de manera que se pueda comprender de dónde provienen las correcciones diferenciales del sistema, mencionadas ya en varias ocasiones.

Acto seguido, se desarrollará el funcionamiento del posicionamiento relativo, que permite, a través de las correcciones diferenciales, determinar la posición de cualquier objeto móvil dentro del rango de cobertura. En el caso del GBAS, la posición de la aeronave.

Por último, se analizarán todas las fuentes de error que pueden interferir degradando las prestaciones del sistema. Una vez determinadas, se procederá a exponer las medidas y los procedimientos que se emplean para evitar en la medida de lo posible que dichas fuentes de error puedan traducirse en una disminución de la integridad del sistema.

### 4.1 Posicionamiento diferencial por satélite

Como se desarrolló en apartados anteriores, mediante el sistema global de navegación por satélite (GNSS) es posible determinar la posición de cualquier objeto mediante la recepción y el análisis de las señales emitidas por las constelaciones de satélites existentes.

El cálculo de la posición depende básicamente de dos parámetros: la posición del satélite y el reloj del mismo. Dicho conjunto de datos es conocido como efemérides del satélite y es transmitido por el satélite constantemente hacia la Tierra, de manera que cualquier receptor dentro de su rango de cobertura es capaz de recibirla y decodificarla.

El receptor GNSS, el cual posee un reloj sincronizado con el reloj atómico del satélite, recibe el mensaje de efemérides que contiene tanto la hora exacta a la que el satélite emitió el mensaje como la posición del mismo en dicho instante.

Considerando que la señal viaja a la velocidad de la luz, y conociendo la diferencia de tiempo entre el instante de emisión de la señal y el instante en el que se recibe, es posible determinar la distancia receptor-satélite. De este modo, la recepción de tres señales GNSS independientes permite la trilateración de la posición del receptor sobre la superficie terrestre.

Ahora bien, el sistema GNSS está sujeto a diferentes fuentes que generan una incertidumbre en la posición, debido a los errores de sincronismo entre relojes, retardos ionosféricos, efectos de la relatividad, etc. Errores de que induzcan una variación del orden de nanosegundos en el cálculo del tiempo transcurrido desde la emisión hasta la recepción de la señal se traducen en errores de posicionamiento de centenas de metros.

Debido a esta incertidumbre, la distancia calculada mediante la trilateración GNSS posee cierta incertidumbre y se denomina pseudodistancia.



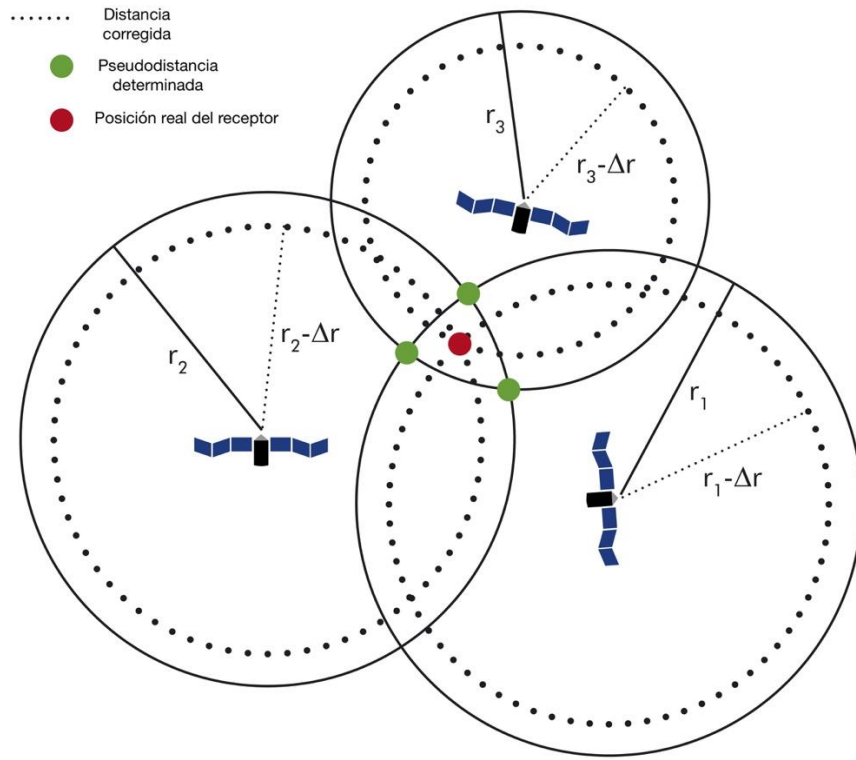


Figura 4-1. Representación gráfica de trilateración de la posición mediante satélite

En base a este concepto, los receptores GNSS estiman la pseudodistancia de las señales mediante la siguiente relación.

$$\rho_i = c \cdot \Delta t_i \quad (4-1)$$

Donde  $\hat{\rho}_i$  es la pseudodistancia medida por el satélite  $i$ ,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $\Delta t_i$  la diferencia de tiempo entre el instante de emisión de la señal desde el satélite  $i$  y el instante de recepción de la misma.

Teniendo en cuenta los principales errores mencionados, dicha relación no proporcionará una medida de la posición precisa. En consecuencia, la pseudodistancia se reformula como sigue.

$$\hat{\rho}_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} - c \cdot \Delta t_r - \Delta \rho_i \quad (4-2)$$

Donde:

- $x_i, y_i, z_i$  representa la posición del  $i$ -ésimo satélite GNSS y expresada en coordenadas cartesianas (ECEF).
- $x_r, y_r, z_r$  representa la posición real del receptor, calculada mediante la señal GNSS y expresada en coordenadas cartesianas (ECEF)
- $\Delta t_r$  es el error por desviación de reloj.
- $\Delta \rho_i$  es el error en la pseudodistancia generado por las diferentes fuentes de error (ionosfera, relatividad, reflexiones, etc.) para el  $i$ -ésimo satélite
- $\rho_i$  es el valor de distancia real entre el receptor y el  $i$ -ésimo satélite
- $c$  representa la velocidad de propagación de la luz en el vacío



Suponiendo conocida con exactitud tanto la posición real del receptor, como los errores por desviación de reloj, es posible invertir la ecuación para obtener el error en la pseudodistancia  $\Delta\rho_i$  del siguiente modo.

$$\Delta\rho_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} - c \cdot \Delta t_r - \hat{\rho}_i \quad (4-3)$$

Este término incorporará todo el conjunto de fuentes de error que afecten a la medida de la pseudodistancia.

De esta forma, el sistema receptor, en el caso del GBAS la unidad central terrestre, es capaz de calcular el error en la pseudodistancia y transmitir dicho dato, denominado correcciones diferenciales, a los usuarios (aeronaves) para que calculen su posición teniendo en cuenta el mismo obteniendo así mediciones de la posición más precisas. Este procedimiento es conocido como posicionamiento diferencial por satélite.

## 4.2 Cálculo de correcciones diferenciales y pseudodistancia corregida

Una vez comprendido la idea general del posicionamiento diferencial por satélite se procede a continuación a desarrollar con mayor precisión el procedimiento de cálculo empleado para obtener las correlaciones. Como se ha mencionado anteriormente, este procedimiento es calculado en tiempo real en la unidad central terrestre del GBAS.

Se supone conocida la posición exacta de la antena (o antenas) de la unidad de recepción de GBAS:  $(x_r, y_r, z_r)$ .

Así mismo, se conoce, contenida en las efemérides del mensaje GNSS, la posición exacta del satélite  $i$  en el instante  $t_0$ :  $(x_i, y_i, z_i)$ .

En consecuencia, la distancia real satélite receptor en dicho instante es conocida y se calcula como:

$$R_r^i(t_0) = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} \quad (4-4)$$

De este modo, la pseudodistancia satélite-receptor calculada mediante la señal GNSS en el instante  $t_0$  será:

$$\rho_r^i(t_0) = R_r^i(t_0) + \varepsilon_r^i(t_0) + \varepsilon^i(t_0) + \varepsilon_r(t_0) \quad (4-5)$$

Donde:

- $R_r^i(t_0)$ : es la distancia satélite-receptor real calculada en el instante  $t_0$
- $\varepsilon_r^i(t_0)$ : representa los errores dependientes de la interacción satélite-receptor en el instante  $t_0$  (ionosféricos, troposféricos, relativistas, etc.)
- $\varepsilon^i(t_0)$ : representa los errores originados únicamente por satélite en el instante  $t_0$  (errores sincronización en el reloj GNSS)
- $\varepsilon_r(t_0)$ : representa los errores debidos únicamente al receptor en el instante  $t_0$  (errores de sincronización en el reloj del receptor, reflexiones, etc.)

Conocidos por tanto en este instante  $t_0$  tanto la distancia real satélite-receptor  $R_r^i(t_0)$  como la pseudodistancia satélite-receptor  $\rho_r^i(t_0)$ , es posible calcular para dicho instante la corrección diferencial para el satélite  $i$  en cuestión, denominada  $PRC^i(t_0)$ .

$$PRC^i(t_0) = R_r^i(t_0) - \rho_r^i(t_0) \quad (4-6)$$

$$PRC^i(t_0) = - [\varepsilon_r^i(t_0) + \varepsilon^i(t_0) + \varepsilon_r(t_0)] \quad (4-7)$$

Dado que la corrección calculada en la unidad central terrestre será transmitida posteriormente a la aeronave (usuario), esta se aplicará en un instante inmediatamente posterior. Para corregir este desfase temporal se aplica un factor denominado Corrección de Tasa de Alcance o Range Rate Correction (RRC).

De este modo, la corrección diferencial que se aplicará en la aeronave en el instante  $t$  inmediatamente posterior será:

$$PRC^i(t) = PRC^i(t_0) + RRC^i(t_0) \cdot (t - t_0) \quad (4-8)$$

Donde  $RRC^i(t_0)$  es la mencionada Corrección de Tasa de Alcance.

Una vez calculada la corrección diferencial en el instante  $t$ ,  $PRC^i(t)$ , esta se aplica a la medida de pseudodistancia que calcula la propia aeronave mediante la señal GNSS obteniendo la pseudodistancia aeronave-satélite corregida.

$$\rho_{u_{corregida}}^i(t) = \rho_u^i(t) + PRC^i(t) \quad (4-9)$$

Donde, desarrollando el término  $PRC^i(t)$  y teniendo en cuenta que los errores debidos únicamente al satélite  $i$  se cancelan:

$$\rho_{u_{corregida}}^i(t) = R_u^i(t) + [\varepsilon_u^i(t_0) - \varepsilon_r^i(t_0)] + [\varepsilon_u(t_0) - \varepsilon_r(t_0)] + RRC^i(t_0) \cdot (t - t_0) \quad (4-10)$$

Las diferencias entre los términos de error se pueden agrupar como:

- $\varepsilon_{ur}^i(t_0) = [\varepsilon_u^i(t_0) - \varepsilon_r^i(t_0)]$ : Errores dependientes de la interacción subsistema satélite y subsistema terrestre (errores de órbita, errores por refracción atmosférica, etc.)
- $\varepsilon_{ur}(t_0) = [\varepsilon_u(t_0) - \varepsilon_r(t_0)]$ : Errores dependientes del subsistema terrestre (errores de reloj, reflexiones electromagnéticas, etc.)

Para así finalmente obtener a bordo de la aeronave un valor de pseudodistancia corregida como sigue en 4-11:

$$\rho_{u_{corregida}}^i(t) = R_u^i(t) + \varepsilon_{ur}^i(t_0) + \varepsilon_{ur}(t_0) + RRC^i(t_0) \cdot (t - t_0) \quad (4-11)$$

Como se observa, el valor de posicionamiento de la aeronave obtenido después de aplicar la corrección diferencial no coincide con la posición real de la misma. En base a ello se hacen una serie de consideraciones.

En primer lugar, es necesaria la corrección de tasa de alcance, la cual mejora los resultados, aunque no elimina por completo el problema del desfase entre los instantes de cálculo y aplicación de la PRC.

Así mismo aparecen una serie de términos de error  $\varepsilon_{ur}^i(t_0)$  y  $\varepsilon_{ur}(t_0)$  los cuales no es posible eliminar mediante la corrección diferencial. No obstante, dado que el GBAS está diseñado para que la distancia entre el receptor (unidad central terrestre) y el usuario (aeronave) sea muy pequeña en comparación con la distancia satélite-receptor y satélite-usuario, es posible despreciar la fuente de error  $\varepsilon_{ur}^i(t_0)$  debida a efectos de refracción atmosférica de la señal que serán similares tanto en el receptor como en el usuario.

Es necesario recalcar que el desarrollo aquí seguido se ha basado en la hipótesis de un solo satélite. En su aplicación real, al menos 4 satélites deben de estar disponibles para poder emplear la señal GNSS y hallar, mediante trilateración de la posición, los valores de pseudodistancia.

Del mismo modo, el desarrollo se basa en la existencia de un único receptor, es decir, una única antena GBAS. En el caso real, al existir un mayor número de antenas, el valor de corrección diferencial PRC que se transmite a la aeronave es un promedio entre los calculados en base a cada antena.

Por último, a pesar de que, dicho valor no coincide con la posición real de la aeronave, se trata de un valor mucho más preciso que la propia pseudodistancia sin corrección.

Por consiguiente, este proceso permite aumentar la precisión del GBAS hasta los valores exigidos por OACI para dar servicio durante el guiado de las aeronaves en aproximaciones de precisión de Categoría I.

### 4.3 Fuentes de error en las correcciones GBAS. Niveles de protección y alerta

Como se analizó en apartados anteriores, para las operaciones de aproximación de precisión basadas en el servicio de determinación de la posición GBAS, OACI especifica unos niveles de integridad mínimos. El riesgo de integridad de la señal en el espacio para la Categoría I es  $2 \cdot 10^{-7}$  por aproximación.

El principal enemigo a la hora de alcanzar altos niveles de integridad en el sistema son las diferentes fuentes de error que aparecen durante el funcionamiento del mismo y que afectan directamente a las correcciones diferenciales que el sistema calcula. Como se analizó en el anterior desarrollo matemático, en el cálculo a bordo de la aeronave de la pseudodistancia corregida aparecen dos términos de error denominados  $\varepsilon_{ur}^i(t_0)$  y  $\varepsilon_{ur}(t_0)$ . Dichos términos engloban dentro de ellos las fuentes de error que no es posible mitigar mediante los algoritmos implementados en el sistema GBAS y son los siguientes:

- Contribución al error en pseudodistancia corregida asociado a la estación terrestre.
- Contribución al error en pseudodistancia corregida asociada al sistema de la aeronave.
- Errores debidos a la incertidumbre troposférica residual
- Errores debidos al retardo ionosférico residual.

Dichos errores se caracterizan matemáticamente mediante distribuciones estadísticas gaussianas de media  $\mu$  cero y varianza  $\sigma^2$ . Dicha varianza es una medida de la dispersión del error esperada con respecto a la media, la cual es cero. En concreto, representa el cuadrado de la desviación típica. En la siguiente imagen se puede apreciar la función de distribución gaussiana para distintos valores de varianza y media cero.

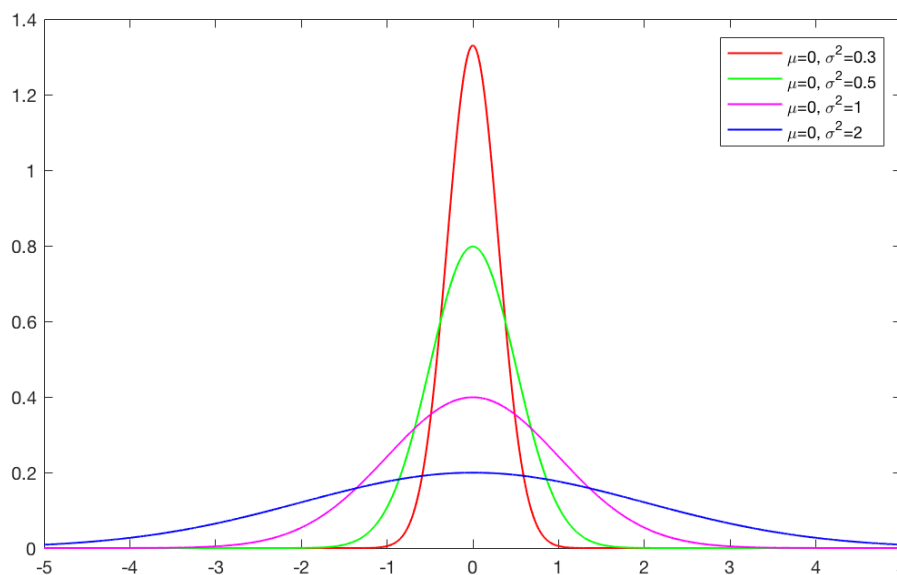


Figura 4-2. Función de densidad de probabilidad para diferentes distribuciones gaussianas.

Como se observa, el valor esperado del error es cero, el cual se corresponde con el máximo valor de la función de densidad. A medida que la varianza de la distribución aumenta la probabilidad de encontrar un error de mayor magnitud, ya sea negativo o positivo, aumenta. Por lo tanto, se busca alcanzar valores de varianza lo más cercano posible a cero.

En consecuencia, cada una de las cuatro fuentes de error existentes queda caracterizada por su varianza, donde:

- $\sigma_{pr_{gnd,i}}$  : desviación típica de la contribución al error en pseudodistancia de la estación terrestre para el satélite  $i$ -ésimo.

- $\sigma_{pr_{air},i}$  : desviación típica de la contribución al error en pseudodistancia del subsistema aeronave para el satélite i-ésimo.
- $\sigma_{tropo,i}$  : desviación típica del error incertidumbre troposférica residual para el satélite i-ésimo.
- $\sigma_{iono,i}$  : desviación típica del error de retardo ionosférico residual para el satélite i-ésimo.

Una vez definidas las fuentes de error se procede a describir con mayor precisión cada una de ellas.

#### 4.3.1 Contribución al error de pseudodistancia del subsistema terrestre

La contribución al error en pseudodistancia terrestre ( $\sigma_{pr_{gnd},i}$ ), es provocado por diferentes fuentes de error que afectan al subsistema de estación terrestre del GBAS. Entre dichas fuentes de error que contribuyen a la incertidumbre de las medidas de pseudodistancia corregidas se incluyen el ruido del receptor, multitrayectos y errores de calibración del centro de fase de la antena.

El subsistema terrestre transmite el valor del término  $\sigma_{pr_{gnd},i}$  en el mensaje VDB emitido hacia la aeronave. Este valor es función del ángulo de elevación del satélite i del cual se está recibiendo la medida. Para calcular dicho valor, el subsistema terrestre procesa una estimación de dicho error para cada uno de los receptores de referencia instalados. Posteriormente dichos valores son inflados para cubrir la posibilidad de errores residuales. Finalmente se selecciona el más conservador de ellos, el cual será el valor emitido de  $\sigma_{pr_{gnd},i}$  dentro de la señal VDB.

El subsistema de tierra se caracteriza por dos designadores los cuales están asociados directamente con la contribución al error de pseudodistancia. Estos son:

##### Ground Accuracy Designator (GAD):

Este designador determina el nivel de precisión que ofrece la subestación terrestre. Está formado por un valor numérico que determina el número de receptores de referencia instalados en el aeropuerto y por una letra de designador de exactitud de tierra. Dicho valor alfabético varía entre A, B y C, donde el valor A corresponde con una precisión estándar, el valor B con una precisión mejorada y el valor C representa la más alta precisión basada en técnicas avanzadas de mitigación de errores. El GAD viene determinado por el valor  $\sigma_{pr_{gnd},i}$  mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{pr_{gnd},i} \leq \sqrt{\frac{\left(a_0 + a_1 e^{\left(-\frac{\theta_i}{\theta_0}\right)}\right)^2}{N}} + (a_2)^2 \quad (4-12)$$

Dónde:

- N = número de receptores de referencia GNSS instalados
- i = i-ésimo satélite GNSS
- $\theta_n$  = ángulo de elevación del i-ésimo satélite GNSS
- $a_0, a_1, a_2, \theta_0$  = parámetros definidos por OACI para cada uno de los designadores de exactitud en tierra (GAD).

A modo de ampliación, en el Anexo II: Parámetros para el cálculo de las contribuciones de error en pseudodistancia se presentan las tablas correspondientes a los parámetros para cada designador GAD definidos por OACI [4].

### Ground Continuity/Integrity Designator (GCID):

El GCID es un designador numérico que indica la condición de funcionamiento del GBAS. El GCID puede poseer un valor numérico de 1, el cual indica que el sistema GBAS cumple con los requerimientos demandados para asistir a operaciones de aproximación de precisión de Categoría I.

Así mismo, se le asigna un valor de 7 en el caso de que no se encuentre en condiciones de funcionalidad. Se reservan una serie de valores extra (GCID 2, GCID 3 y GCID 4) para asegurar la compatibilidad del equipo con los GBAS del futuro, los cuales se prevé que asistan aproximaciones de Categoría II y III.

### 4.3.2 Contribución al error de pseudodistancia del subsistema aeronave

La contribución al error en pseudodistancia del subsistema aeronave ( $\sigma_{pr_{air,i}}$ ) es generada por dos contribuciones. En primer lugar, aparecen los errores derivados de multitrayectos de la señal recibida, es decir, los efectos de las reflexiones producidas por las diferentes superficies de la aeronave misma. Así mismo, la otra contribución es debida a errores derivados del equipo receptor de abordó.

De este modo, el valor de  $\sigma_{pr_{air,i}}$  es posible obtenerlo mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{pr_{air,i}} = \sqrt{\sigma_{receptor}^2(El_i) + \sigma_{multitrayecto}^2(El_i)} \quad (4-13)$$

Siendo:

- $El_i$  = ángulo de elevación del i-ésimo satélite GNSS (en grados)
- $Az_i$  = azimut del i-ésimo satélite GNSS medido en sentido antihorario (en grados).

El valor  $\sigma_{multitrayecto}(El_i)$  viene definido en función de la elevación del satélite como:

$$\sigma_{multitrayecto}(El_i) = 0,13 + 0,53 \cdot e^{-\left(\frac{El_i}{10}\right)} \quad (4-14)$$

Al igual que ocurría con la contribución del subsistema terrestre, la contribución del subsistema de la aeronave está caracterizada por un designador denominado Aircraft Accuracy Designator (AAD). Está compuesto por un valor alfabético que puede tomar dos valores. Un valor A para sistemas de precisión estándar y un valor B para sistemas que ofrecen una precisión mejorada.

El valor del AAD queda establecido por el valor  $\sigma_{receptor}(El_i)$  de la siguiente forma:

$$\sigma_{receptor}^2(El_i) \leq a_0 + a_1 \cdot e^{-El_i/\theta_0} \quad (4-15)$$

Los valores  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $\theta_0$  son parámetros definidos por OACI para cada uno de los designadores AAD. A modo de ampliación, en el Anexo II: Parámetros para el cálculo de las contribuciones de error en pseudodistancia, se muestra la tabla que relaciona estos valores mencionados con el tipo de designador AAD.

### 4.3.3 Error de incertidumbre troposférica residual

La troposfera es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre. Posee alrededor de 17 km de espesor en el ecuador y tan solo 7 km en los polos.

Los principales efectos que la troposfera puede producir sobre la propagación de ondas GNSS son la atenuación y la refracción troposférica, causadas por la humedad atmosférica, lluvia, nieve o cualquier otro tipo de hidrometeoros.

Se estima que un retraso troposférico típico puede oscilar entre los 3 y los 100 nanosegundos, lo que puede provocar un error de precisión de hasta pocas decenas de metros. Dichos efectos se hacen importantes a partir

de una frecuencia de 3 GHz, por lo que la señal VDB emitida en el rango de frecuencias VHF (30-300 MHz) desde la estación terrestre hacia la aeronave es especialmente vulnerable por los efectos troposféricos.

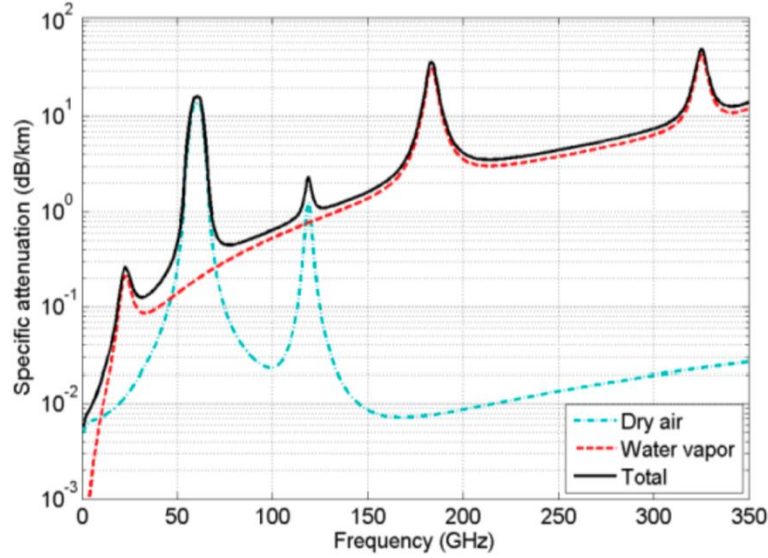


Figura 4-3. Atenuación troposférica (dB/km) para diferentes. Fuente [6]

Para atenuar los errores de incertidumbre troposférica residual se emplean modelos troposféricos que dependen de la presión, temperatura, humedad y altitud. Empleando un modelo troposférico la subestación terrestre es capaz de generar la variable aleatoria gaussiana asociada a la incertidumbre de refractividad troposférica.

Puesto que la refracción troposférica es un fenómeno local, todos los usuarios calcularán sus propias correcciones de retardo troposférico.

El parámetro  $\sigma_{tropo,i}$  se puede estimar como:

$$\sigma_{tropo,i} = \sigma_N h_0 \frac{10^{-6}}{\sqrt{0.002 + \sin^2(EL_i)}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta h}{h_0}}\right) \quad (4-16)$$

Donde:

- $\sigma_N$  = desviación típica de la incertidumbre de refractividad troposférica
- $\Delta h$  = altura de la aeronave sobre el punto de referencia del GBAS
- $EL_i$  = ángulo de elevación del i-ésimo satélite
- $h_0$  = factor de altura de escala troposférica

Los parámetros  $\sigma_N$ ,  $EL_i$  y  $h_0$  son transmitidos por la subestación terrestre hacia la aeronave dentro del mensaje tipo 2 de la señal VDB.

Una vez recibido, el MMR de la aeronave computa el cálculo para determinar finalmente el error de incertidumbre troposférica residual  $\sigma_{tropo,i}$ , cuya corrección se aplicará a la pseudodistancia corregida.

#### 4.3.4 Error ionosférico residual

La ionosfera es otra de las capas atmosféricas terrestres. Se trata de una de las más altas, la cual se extiende aproximadamente desde los 60 hasta los 400 km de altura.

Debido a su ionización, refleja las señales radioeléctricas hasta las frecuencias de 30 MHz. Los gases presentes en la ionosfera aparecen ionizados debido a la absorción de radiaciones solares de alta frecuencia como rayos gamma y rayos X.

En el caso de la ionosfera, la señal VBD emitida por la subestación terrestre no se ve afectada, ya que actúa localmente. No obstante, la señal GNSS atraviesa dicha capa, sufriendo efectos adversos como son un retardo en la señal o centelleos de fase y amplitud. Estos efectos son función de la cantidad de electrones libres presentes en la ionosfera, la cual varía según la hora del día, la época del año, la actividad solar y la latitud.

Para corregir los retardos ionosféricos se emplean modelos ionosféricos que estiman el comportamiento de la ionosfera.

A la hora de transmitir la señal corregida, se asume que el retardo ionosférico es el mismo tanto para la aeronave como para la estación terrestre. Dicho error ionosférico dependerá sensiblemente de la elevación del satélite GNSS que emite la señal, dado que, a menor elevación, mayor será el recorrido, u oblicuidad, que la señal realiza atravesando la ionosfera.

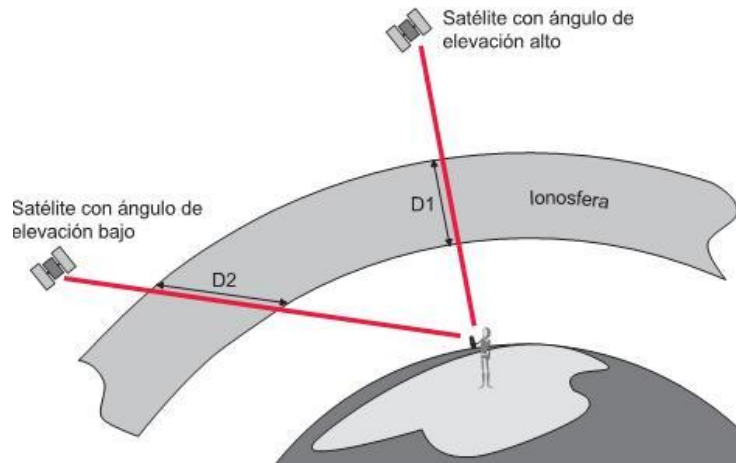


Figura 4-4. Oblicuidad de la señal GNSS

El valor de  $\sigma_{iono,i}$  es posible obtenerlo mediante la siguiente relación.

$$\sigma_{iono,i} = F_{pp} \cdot \sigma_{vert-iono-gradiente} \cdot (x_{air} + 2 \cdot \tau \cdot v_{air}) \quad (4-17)$$

Donde:

- $\sigma_{vert-iono-gradiente}$  = desviación típica de una distribución normal asociada a la incertidumbre ionosférica residual debida a la descorrelación espacial. Obtenida del modelo ionosférico.
- $F_{pp} = \left[ 1 - \left( \frac{R_e \cos(EI_i)}{R_e + 350} \right)^2 \right]^{-0.5}$  = factor de oblicuidad. Siendo  $R_e$  el radio medio terrestre.
- $x_{air}$  = distancia entre la posición actual de la aeronave y el punto de referencia GBAS.
- $\tau$  = constante de tiempo = 100 s
- $v_{air}$  = velocidad de aproximación horizontal de la aeronave.

Dichos parámetros son transmitidos desde la estación terrestre del GBAS hacia la aeronave dentro del mensaje de tipo 2 de la emisión VBD, donde se calcula el valor del error ionosférico  $\sigma_{iono,i}$ .

#### 4.3.5 Error total en pseudodistancia corregida

Como ya se ha mencionado, todos estos errores se modelan según variables aleatorias de distribución gaussiana, media cero y varianza igual a  $\sigma_{pr_{gnd,i}}^2$ ,  $\sigma_{pr_{air,i}}^2$ ,  $\sigma_{tropo,i}^2$  y  $\sigma_{iono,i}^2$  en función de cuál sea la fuente de error.

Haciendo uso de la propiedad de la distribución gaussiana, según la cual, la suma de variables aleatorias de distribución gaussiana es igual a otra distribución gaussiana de media la suma de sus medias y de varianza la suma de sus varianzas, se puede determinar un error total en pseudodistancia corregida como la suma de todos

los anteriores.

Sean las distribuciones gaussianas de los errores subsistema terrestre, subsistema aeronave, troposféricos e ionosféricos para un satélite  $i$  respectivamente:

- $X_{gnd,i} \sim N(0, \sigma_{pr_{gnd,i}}^2)$
- $X_{air,i} \sim N(0, \sigma_{pr_{air,i}}^2)$
- $X_{tropo,i} \sim N(0, \sigma_{tropo,i}^2)$
- $X_{iono,i} \sim N(0, \sigma_{iono,i}^2)$

El error total se distribuye como sigue:

$$X_{total,i} \sim N\left(0, \sigma_{pr_{gnd,i}}^2 + \sigma_{pr_{air,i}}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 + \sigma_{tropo,i}^2\right) \sim N(0, \sigma_i^2) \quad (4-18)$$

Donde:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{pr_{gnd,i}}^2 + \sigma_{pr_{air,i}}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 \quad (4-19)$$

De este modo quedan todos los anteriores errores agrupados en una misma distribución estadística gaussiana caracterizada por una varianza  $\sigma_i^2$ .

#### 4.3.6 Niveles de protección y alerta

Como se ha podido comprobar en los apartados precedentes, las correcciones diferenciales GBAS no son capaces de eliminar todas las fuentes de error presentes en el posicionamiento diferencial de la aeronave. Esto repercute en el nivel de integridad que ofrece el sistema.

Con el objetivo de cumplir la aplicación de los requisitos de integridad para el GBAS, se construyen unos modelos de protección/alerta tanto lateral como vertical basándose en modelos estadísticos de las componentes de error de pseudodistancia, las cuales como se ha analizado anteriormente son distribuciones normales de media cero.

De este modo se consigue dotar al sistema GBAS de una funcionalidad de protección y alerta que actúe frente a las fuentes de error presentes en la señal de pseudodistancia corregida.

Dicha funcionalidad de protección y alerta se establece mediante unos niveles de protección, los cuales son:

- LPL: Lateral Protection Level
- VPL: Vertical Protection Level
- LAL: Lateral Alert Limit
- VAL: Vertical Alert Limit

Los niveles de protección vertical y lateral (VPL y LPL) de la señal en el espacio son los límites superiores de confianza del error de posición relativo. Estos niveles de protección varían en función del estado de funcionamiento del sistema GBAS. Así mismo, los límites de alerta vertical y horizontal definen los límites por debajo de los cuales los niveles de protección deben encontrarse en todo momento para poder hacer uso del sistema GBAS.

En las siguientes ilustraciones se esquematiza su funcionamiento.



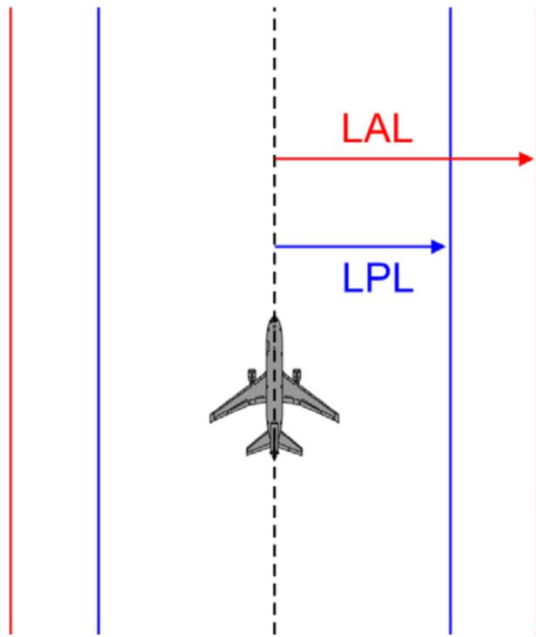


Figura 4-5. Nivel de protección y límite de alerta lateral

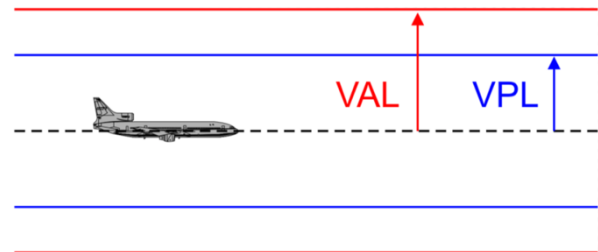


Figura 4-6. Nivel de protección y límite de alerta vertical

En rojo se aprecian los límites de alerta (LAL y VAL) mientras que en azul se representan los límites de protección (LPL y VAL).

Los límites de alerta se establecen en función del tipo de aproximación a la que el sistema GBAS sirva (APV, CAT I, CAT II o CAT III). Los límites de protección se actualizan constantemente en función de las estimaciones de los errores de la señal de pseudodistancia corregida. Pueden existir diferentes situaciones.

- $VPL < VAL$  y  $LPL < LAL$ : Ambos límites de protección son inferiores a los límites de alerta por lo que el sistema GBAS proporciona la precisión suficiente para cumplir con los requisitos mínimos y por lo tanto la aproximación GBAS se encuentra disponible en el aeropuerto.
- $VPL > VAL$  ó  $LPL > LAL$ : Alguno de los límites de protección superan en magnitud a los límites de alerta. Se acciona la alerta por falta de integridad en la señal y se declaran como no disponibles las aproximaciones afectadas basadas en GBAS.
- $VPL > VAL$  y  $LPL > LAL$ : Ambos niveles de protección sobrepasan los límites de alerta por lo que igualmente se declaran como no disponibles las aproximaciones GBAS afectadas.

A continuación, se procede a analizar en qué parámetros están basados y como se calculan los niveles de protección y límites de alerta.

#### 4.3.7 Niveles de protección

Los niveles de protección son calculados en base al error total en pseudodistancia corregida. Se consideran dos posibles estados del sistema. Un estado de funcionamiento bajo condiciones de medición sin falla del sistema denominado estado  $H_0$  y un estado degradado del sistema, en el que el funcionamiento se lleva a cabo bajo condiciones de fallo de un receptor de referencia, denominado  $H_1$ .

De este modo, los límites de protección toman el valor según la siguiente expresión:

$$VPL = \text{MAX}\{VPL_{H_0}, VPL_{H_1}\}$$

$$LPL = \text{MAX}\{LPL_{H_0}, LPL_{H_1}\}$$

Cuando el sistema funciona bajo condiciones de medición sin falla los valores  $VPL_{H_1}$  y  $HPL_{H_1}$  son establecidos a cero.

Suponiendo un estado de funcionamiento sin fallas (H0), los límites de protección tanto lateral como vertical se calculan en función del error en pseudodistancia total del sistema caracterizado por  $\sigma_i^2$ . Éstos se definen como sigue.

$$VPL_{HO} = K_{ffmd} \sqrt{\sum_{i=1}^N s_{vert,i}^2 \cdot \sigma_i^2} \quad (4-20)$$

$$LPL_{HO} = K_{ffmd} \sqrt{\sum_{i=1}^N s_{lat,i}^2 \cdot \sigma_i^2} \quad (4-21)$$

Siendo:

- $K_{ffmd}$  = multiplicador derivado de la probabilidad de detección frustrada sin falla;
- $s_{vert,i} = s_{v,i} + s_{x,i} \cdot \tan(GPA)$ ;
- $s_{lat,i} = s_{y,i}$ ;
- $s_{x,i}$  = derivada parcial del error de posición en la dirección x respecto al error de pseudodistancia del i-ésimo satélite;
- $s_{y,i}$  = derivada parcial del error de posición en la dirección y respecto al error de pseudodistancia del i-ésimo satélite;
- $s_{v,i}$  = derivada parcial del error de posición en la dirección vertical respecto al error de pseudodistancia del i-ésimo satélite;
- $GPA$  = ángulo de trayectoria de planeo de la FAS
- $N$  = número total de satélites de los que se recibe la señal GNSS
- $i$  = índice del i-ésimo satélite

El valor de  $K_{ffmd}$  es función del número de receptores de referencia según la siguiente tabla.

$M_i$	$K_{ffmd}$
1	6,86
2	5,762
3	5,81
4	5,847

Tabla 4–1. Valores de  $K_{ffmd}$  para el cálculo de LPL y VPL

Donde el parámetro  $M_i$  representa el número de receptores de referencia utilizados para calcular las correcciones de pseudodistancia del i-ésimo satélite.

Los errores de posición que aparecen en las definiciones de los niveles de protección están directamente relacionados con el error en pseudodistancia corregida. Éstos se obtienen mediante la proyección del error en pseudodistancia corregida ( $\sigma_i^2$ ) en un sistema de referencia de coordenadas centrado en la aeronave tal que:

- El eje X se ubica a lo largo de la derrota positiva hacia delante.
- El eje Y es perpendicular a la derrota positiva apuntando hacia la izquierda, contenido en el plano tangente horizontal local de la aeronave.
- El eje v es positivo hacia arriba formando un triedro ortogonal con los ejes X e Y.

Si se desea consultar el desarrollo que permite proyectar los errores en el dominio de la pseudodistancia al dominio de la posición mediante dicho sistema de referencia, este se encuentra desarrollado en el Anexo III: Proyección de los errores del dominio de la pseudodistancia al dominio de la posición.

#### 4.3.8 Límites de alerta

Los límites de alerta se establecen a lo largo de la trayectoria final de aproximación (FAS) se establecen en función de los parámetros FASLAL y FASVAL. Dichos parámetros son transmitidos en el bloque de datos FAS dentro del mensaje de tipo 4. En la Tabla 4-2 y Tabla 4-3 se definen los valores de los límites de alerta para aproximaciones de precisión de categoría I.

Distancia horizontal de la posición de la aeronave desde el LTP “D” (metros)	Límite lateral de alerta (metros)
$291 < D \leq 873$	FASLAL
$873 < D \leq 7500$	$0,0044 \cdot D(m) + \text{FASLAL} - 3,85$
$D > 7500$	$\text{FASLAL} + 29,15$
$291 < D \leq 873$	FASLAL

Tabla 4-2. Límite de alerta lateral para aproximaciones de precisión de Categoría I

Distancia horizontal de la posición de la aeronave desde el LTP “D” (metros)	Límite lateral de alerta (metros)
$291 < D \leq 873$	FASLAL
$873 < D \leq 7500$	$0,0044 \cdot D(m) + \text{FASLAL} - 3,85$
$D > 7500$	$\text{FASLAL} + 29,15$
$291 < D \leq 873$	FASLAL

Tabla 4-3. Límite de alerta vertical para aproximaciones de precisión de Categoría I

Para posiciones de aeronave en las que la desviación lateral con respecto al FAS excede del doble de la desviación a la que se logra una desviación lateral de plena escala en el indicador de desviación de rumbo horizontal el límite de alerta lateral se ajusta al valor máximo indicado en la Tabla 4-2.

Igualmente, cuando la desviación vertical con respecto al FAS excede del doble de la desviación a la que se logra una desviación de vuelo hacia debajo de escala completa en el indicador de desviación de rumbo vertical, el límite de alerta vertical se ajusta al valor máximo indicado en la Tabla 4-3.

Así mismo, para una mejor comprensión, se adjunta la siguiente ilustración en la que se muestra la definición de las distancias D y H empleadas en la determinación de los límites de alerta.

Como se observa, la distancia D es medida a lo largo del FAS desde el punto LTP hasta la intersección de un

arco de circunferencia con el propio FAS. Dicho arco está centrado en el GARP y pasa por la posición de la aeronave.

Del mismo modo, la altura  $H$  es medida en dirección vertical desde el plano horizontal que contiene tanto al LTP como al GARP hasta la intersección de un arco de circunferencia centrado en el GPIP y que pasa por la posición de la aeronave, con la trayectoria FAS.

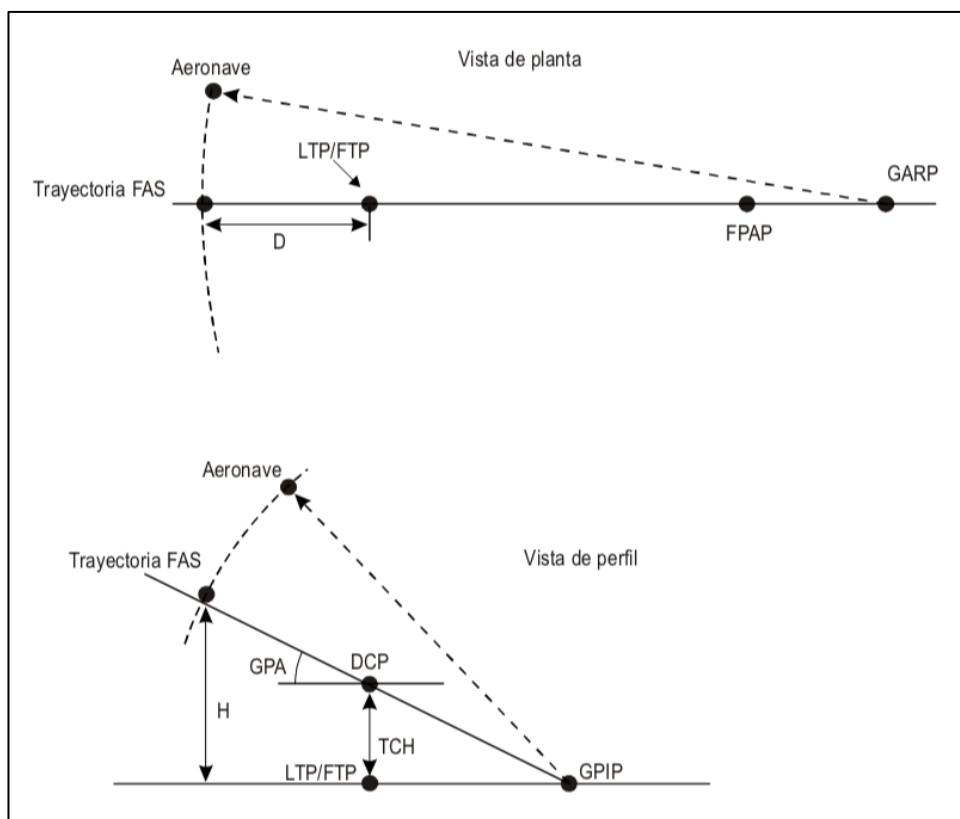


Figura 4-7. Definición de los parámetros  $D$  y  $H$  en el cálculo de los límites de alerta. Fuente: OACI [4]

## 5 REQUISITOS NORMATIVOS PARA LA INSTALACIÓN DEL GBAS

---

Concluidos los apartados anteriores se da por cerrada la descripción teórica del sistema GBAS. Una vez comprendida su función, sus ventajas y su funcionamiento, se procede a aplicar todo el conocimiento adquirido al aeropuerto que ocupa este proyecto en cuestión. El Aeropuerto de Gran Canaria (LPA).

Para proyectar la instauración de un GBAS en LPA, es necesario conocer en primer lugar una serie de conceptos y requisitos normativos que se imponen a la hora de realizar la instalación. Dichos requisitos son aplicables al ya conocido subsistema terrestre del GBAS, en torno a cuál versará tanto el presente como los consecutivos apartados.

En concreto, en este Apartado 5 se desarrollan dichos conceptos y términos normativos para determinar posteriormente el posicionamiento de todos los sistemas que componen la arquitectura terrestre del GBAS dentro del recinto aeroportuario en base a un criterio adecuado.

Para ello se han analizado varios documentos técnicos que contienen los requisitos normativos existentes en la actualidad, así como diversos aspectos técnicos que conciernen a la instalación de estos sistemas terrestres. Dichas fuentes se corresponden con dos documentos emitidos por dos de las principales instituciones de aviación civil a nivel mundial como son OACI y FAA.

El documento OACI se corresponde con su “Guía para la implementación de GBAS” [7] y el correspondiente de la FAA es la “Guía para la instalación del GBAS” [8], ambos en inglés y enumerados en el apartado bibliográfico.

Es necesario recalcar que, según la normativa desarrollada tanto por OACI como por la FAA, existen una serie de requisitos que se centran en el aspecto radioeléctrico de la señal, como son mínimos de cobertura, intensidad de la señal o degradación de la misma. Dichos requisitos deben ser verificados mediante pruebas de señal dentro del aeropuerto una vez instalado el sistema completo, algo que resulta inaccesible desde el punto de partida de este proyecto académico.

Generalmente, el proceso consta de dos fases. La primera consiste en analizar los requisitos de emplazamiento y determinar posibles configuraciones de emplazamiento que respeten la normativa. La segunda consiste en, una vez determinado el emplazamiento y realizada la instalación, realizar test y comprobaciones que aseguren la necesaria calidad de la señal.

Dado que no se dispone de los recursos necesarios para llevar a cabo dicha segunda fase, en el presente proyecto se procederá a realizar la primera de ellas. Esto se traduce en sugerir un “layout” definitivo que recoge la distribución de todos los elementos terrestres necesarios, el cual podría servir como esquema básico para una futura implantación real del GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria.

### 5.1 Requisitos normativos

En términos generales, las estaciones terrestres GBAS son considerablemente flexibles en cuanto a emplazamiento de sus elementos. En comparación con un sistema ILS, cuyos sistemas deben ser ubicados en lugares muy específicos y generan una serie de áreas críticas, el GBAS es un sistema mucho menos restrictivo y que, por lo tanto, ofrece una mayor libertad a la hora de la instalación dentro del aeropuerto.

Los sistemas GBAS únicamente poseen ciertas restricciones con respecto a la distancia entre los elementos del subsistema terrestre (antenas GNSS, antena VDB, etc.), distancia máxima hasta cabeceras o distancias mínimas dentro de las áreas operacionales. Más allá de estos requisitos, puede ubicarse con total independencia de los umbrales de pista, lo que supone un gran beneficio para aeropuertos de gran densidad con una distribución compleja, independientemente de poder servir a todas sus pistas con un único sistema.

No obstante, el hecho de que el GBAS no posea unos requisitos de emplazamiento muy restrictivos, y más aún, que sea un sistema novedoso y relativamente reciente, hace que en la mayoría de aeropuertos en los que se

instala, no exista una zona o área protegida previamente considerada para su instalación, como si ocurre con el ILS. En numerosas ocasiones, esto conlleva que el hacerle un hueco al GBAS dentro del área aeroportuaria sea una labor delicada y que en ocasiones conlleve realizar ciertas modificaciones en la distribución de los diferentes elementos aeroportuarios.

A forma de recordatorio de previos apartados, se determina que el segmento terrestre del GBAS, frecuentemente mencionado en este proyecto como subsistema terrestre consta de los siguientes elementos:

- Unidad de recepción: consta de un conjunto de antenas receptoras GNSS (RRA's) las cuales captan las señales, anteriormente descritas, emitidas por los satélites. De aquí en adelante antena GNSS o RRA.
- Unidad de transmisión: compuesta por una antena VDB, la cual emite la señal de posicionamiento hacia las aeronaves en operación. De aquí en adelante antena VDB. En ocasiones se emplazan dos antenas VDB, una de las cuales actúa como transmisora y la otra como receptora para muestrear la propia señal generada por el sistema.
- Unidad de procesamiento: consistente en una caseta conocida como “shelter” dentro de la cual se ubican todos los elementos de control del sistema y monitorización de la señal. De aquí en adelante unidad de procesamiento.

En general, a la hora de llevar a cabo la tarea de identificar potenciales sitios de emplazamiento se estudian una serie de criterios, los cuales afectan a uno o varios de los elementos del subsistema terrestre, y que se proceden a enumerar a continuación.

Criterio de emplazamiento	Elemento al que aplica
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Aspectos de seguridad:</b> Todos los elementos del sistema GBAS deben ser instalados dentro del recinto del aeropuerto, en áreas de seguridad donde el acceso a las mismas esté controlado y restringido.</li> </ul>	Antenas GNSS Antena VDB Unidad de procesamiento
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Servidumbres:</b> La instalación de los nuevos elementos del GBAS debe respetar las existentes servidumbres tanto radioeléctricas como de aeródromo existentes en el aeropuerto.</li> </ul>	Antenas GNSS Antena VDB Unidad de procesamiento
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Volumen de cobertura:</b> Se exige un mínimo de intensidad de señal en las zonas operativas, el cual debe ser analizado.</li> </ul>	Antena VDB
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Distancia hasta cabeceras:</b> La distancia máxima desde la antena transmisora VDB hasta cualquiera de las cabeceras por las cual se ofrezcan aproximaciones GBAS debe ser menor de 5000 metros, con el objetivo de mitigar anomalías ionosféricas.</li> </ul>	Antenas GNSS
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Máscara de elevación sobre el horizonte:</b> obstáculos por debajo de tres grados con respecto al horizonte de las antenas receptoras deben ser evitados.</li> </ul>	Antenas GNSS
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Superficies reflectantes:</b> Se deben evitar superficies susceptibles de crear reflexiones de la señal en el entorno de las antenas, como pueden ser aguas estancadas.</li> </ul>	Antenas GNSS
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Condiciones climáticas y variaciones estacionales:</b> Debe de evitarse colocar los elementos del GBAS en lugares donde, a consecuencia de las inclemencias meteorológicas, su funcionamiento pueda verse afectado. Por ejemplo, áreas susceptibles de acumulación de nieve o posibles inundaciones.</li> </ul>	Antenas GNSS Antena VDB
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Potenciales expansiones del aeropuerto:</b> Se deben de tener en cuenta las posibles expansiones o modificaciones futuras dentro del aeropuerto, como, por ejemplo, la creación de una nueva pista.</li> </ul>	Antenas GNSS Antena VDB Unidad de procesamiento

Tabla 5–1. Criterios de emplazamiento para los elementos del subsistema terrestre GBAS. Fuente: FAA [8]

Teniendo en cuenta los aspectos arriba mencionados, en los siguientes apartados, se llevará a cabo un desarrollo más exhaustivo de los requisitos de emplazamiento para cada uno de los tres principales elementos terrestres del GBAS.

## 5.2 Consideraciones de emplazamiento para antenas GNSS

Como se mencionó en apartados anteriores, las antenas GNSS son antenas receptoras cuya función es recibir la señal proveniente de las distintas constelaciones de satélites de posicionamiento (GPS, Glonass, Galileo, etc.) de manera que se obtengan los valores de hora y pseudodistancia que posteriormente deberán ser corregidos en la unidad de procesamiento.



Figura 5-1. Antena GNSS en el Aeropuerto de Sydney

El número de antenas necesarias para el correcto funcionamiento del GBAS no está claramente definido. Es posible operar con 3 antenas, e incluso únicamente con 2 durante un tiempo limitado.

No obstante, en la mayoría de instalaciones dentro de los principales aeropuertos que se han llevado a cabo hasta hoy en día (Málaga, Bremen, Frankfurt, Zúrich, etc.) poseen 4 antenas activas simultáneamente. De esta forma, mediante redundancia es posible corregir más eficientemente los errores en la señal y aumentar así la robustez del sistema, a cambio, de un mayor coste de instalación y mantenimiento.

De forma habitual, los receptores GNSS se ubican junto a las antenas, de manera que se evita la necesidad de tener que instalar cableado desde la antena hasta la posición del receptor.

Los aspectos más relevantes a tener en cuenta a la hora de posicionarlas son los siguientes.

### 5.2.1 Distancia máxima entre GRP y LTP

El primer criterio a considerar a la hora de ubicar las antenas es la distancia mínima que debe existir entre el GBAS Reference Point (GRP) o punto de referencia GBAS y el Landing Threshold Point (LTP) o punto de umbral de aterrizaje.

Como se definió anteriormente, el GRP es el punto de referencia de la instalación GBAS, el cual se suele situar estratégicamente en una de las antenas GNSS. El LTP se corresponde con el punto de umbral de aterrizaje y comúnmente se ubica en el punto medio del umbral. Cabe recalcar que para cada cabecera en la que exista aproximación GBAS existirá un LTP diferente.

La distancia máxima entre el GRP y el LTP es de 5 km. Por lo tanto, a la hora de ubicar la antena receptora GNSS que sirva como GRP, se debe tener en cuenta que la distancia desde la misma a cualquiera de las cabeceras en las que se sirva aproximación de precisión mediante GBAS debe ser inferior a 5000 metros.

### 5.2.2 Máscara de elevación de horizonte

Idealmente, la antena GNSS RRA debe ser ubicada de manera que esté libre de obstáculos por encima de los 3°



de elevación con respecto a la altura base de la antena, en todas las direcciones. La superficie que delimita esta región se conoce como máscara de elevación sobre horizonte.

A bajas estas elevaciones sobre la altura de la antena, incluso la presencia de vegetación puede bloquear la señal GNSS. Para evitar esto, se establece la máscara. Dicha máscara determinará la altura de la antena, de manera que se deje un horizonte libre de cualquier obstáculo por encima de los 3° de elevación.

A pesar de ello, en un considerable número de casos resultará muy difícil evitar el enmascaramiento por encima de los 3° de elevación, debido a la presencia de construcciones y edificios cercanos. En dichos casos particulares se permite aumentar la elevación a 5°, dado que el impacto de un obstáculo, por debajo de esa elevación, sobre la disponibilidad del sistema sigue siendo mínimo.

### 5.2.3 Reflexiones (multipath) de la señal GNSS y servidumbre LOCA

Disponer de un emplazamiento libre de obstáculos es esencial a la hora de mantener la calidad del sistema. Cualquier tipo de objeto cercano a la antena receptora puedan provocar la recepción de señales reflejadas en el mismo degradando la calidad de la señal. Este fenómeno es conocido como “multipath”.

El “multipath” consiste, básicamente, en reflexiones de la señal satélite generada por objetos cercanos a la antena. Dicho fenómeno genera una degradación las prestaciones del sistema completo. De esta manera, mediante la protección del entorno de la antena se busca asegurar un correcto nivel de precisión, integridad y seguridad del GBAS.

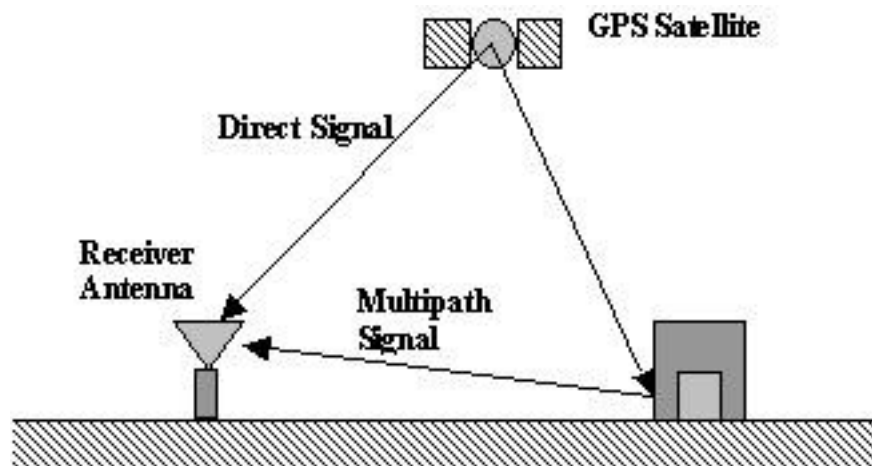


Figura 5-2. Multipath en antena receptora GBAS

Las antenas del GBAS no son capaces de distinguir si la señal recibida proviene directamente del satélite o por el contrario ha sido reflejada previamente en algún obstáculo cercano por lo que resulta fundamental protegerlas ante dicho fenómeno.

Para resolver este problema surgen las LOCA (Local Object Consideration Area).

#### 5.2.3.1 GBAS Local Object Consideration Area (LOCA) para RRAs

La LOCA se define como el volumen que envuelve a una antena de referencia receptora (RRA) o una antena emisora VDB del subsistema terrestre GBAS, dentro del cual se debe asegurar la no existencia de obstáculos – ya sean fijos o móviles- durante su funcionamiento. Equivale a la servidumbre radioeléctrica de las RRA, cuyo objetivo principal es proteger a las antenas del subsistema terrestre de fenómenos no deseados como “multipaths”. Equivale a la servidumbre radioeléctrica de dichas RRA.

Cada antena receptora, o RRA, posee una LOCA propia que consta de tres volúmenes preestablecidos.

- Máscara de elevación de horizonte RRA LOCA
- RRA LOCA interna

- RRA LOCA intermedia
- RRA LOCA externa

A continuación, se procede a describir cada una de ellas:

### **Máscara de elevación de horizonte RRA LOCA**

La superficie RRA LOCA horizontal está formada por un cono de revolución invertido, cuyo vértice coincide con el eje de la RRA a la altura base de la antena. Dicho cono diverge con un ángulo de  $3^\circ$  respecto a la horizontal local y coincide con la máscara de elevación de horizonte mencionada en el apartado anterior.

Todo objeto que se encuentre alrededor de la antena debe quedar por debajo de la superficie generada por la LOCA horizontal, de manera que no penetre en ésta.

De esta forma se busca despejar el horizonte de la antena en todas las direcciones para favorecer así la recepción de la señal GNSS y evitar posibles obstrucciones de la misma que provoquen cualquier pérdida de cobertura degradando la señal.

En el caso de que no sea posible liberar dicha zona de obstáculos, se recomienda que éstos sean enmascarados radioeléctricamente para evitar reflexiones.

### **RRA LOCA interna**

Consiste en un cilindro vertical ubicado alrededor de la antena, cuyo eje coincide con el eje de simetría de la antena. Dicho cilindro posee un radio de 4 metros que se extiende desde la base del terreno envolviendo completamente a la antena.

El área ocupada por la LOCA interior debe permanecer en todo momento libre de objetos fijos o móviles (como vehículos) para proteger el campo cercano de la señal de posibles distorsiones. Del mismo modo, cualquier tipo de vegetación debe ser mitigada dentro de esta región.

Cualquier cerco perimétrico empleado para señalar dicha región debe siempre estar por debajo de la altura base de la antena receptora.

### **RRA LOCA intermedia**

El área delimitado por la LOCA intermedia consiste, al igual que la interior, en un cilindro de radio 50 metros, el cual se extiende desde el nivel del terreno hasta la intersección con la RRA LOCA horizontal.

Idealmente, la zona LOCA intermedia debe estar libre de objetos por lo que la antena RRA debe ubicarse en una posición estratégica con respecto a la pista y al área de movimiento del aeropuerto. No obstante, es tolerable la intrusión de objetos móviles durante cortos periodos de tiempo.

### **RRA LOCA externa**

La LOCA exterior posee la misma forma que la intermedia, con la diferencia de que el cilindro base es mayor. En concreto, la base cilíndrica posee un radio de 155 metros. Se extiende desde el terreno base hasta la intersección con la LOCA horizontal.

Obstáculos móviles y temporales por debajo de la altura base de la antena están permitidos dentro de la LOCA exterior. No obstante, cualquier obstáculo fijo debe ser adecuadamente enmascarado radioeléctricamente.

En la siguiente figura se representan gráficamente las superficies descritas.

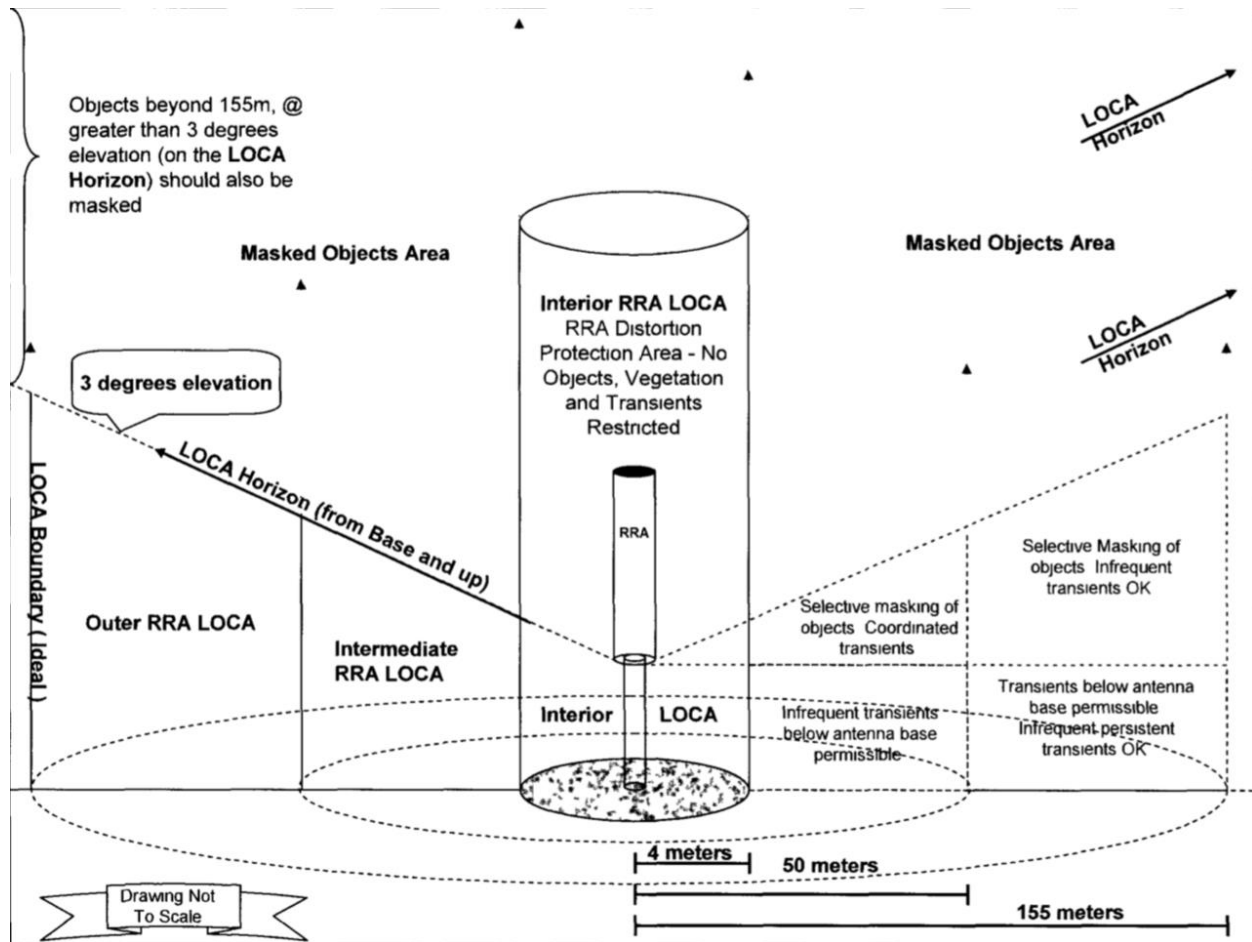


Figura 5-3. LOCA de antena RRA. Fuente: FAA [8]

A pesar de que es recomendable mantener los volúmenes delimitados por las LOCA totalmente libres de intrusiones durante el funcionamiento del sistema, en multitud de ocasiones resulta altamente complejo ubicar las antenas de manera que esto se cumpla.

En aeropuertos de tráfico denso y especialmente con varias pistas, el gran número de calles de rodaje, zonas de terminal, rampa y hangares hace que en ocasiones se vulneren los límites de las LOCAs, existiendo en ciertos instantes en los que se produzcan intrusiones por parte de las aeronaves durante su movimiento en tierra.

Dichas intrusiones pueden provocar que se incremente la desviación típica de la contribución al error en pseudodistancia de la estación terrestre para el satélite en cuestión o parámetro  $\sigma_{pr_{gnd,i}}$ .

#### 5.2.4 Reflexiones correladas. Distancia mínima de separación

Como se ha mencionado anteriormente, las reflexiones o “multipath” son un fenómeno indeseado cuando afectan a uno de los receptores en concreto. No obstante, pueden resultar crítico cuando afecta a varios de los receptores simultáneamente.

Mientras que el fenómeno de multipath afecte únicamente a un receptor, su efecto perjudicial es relativamente filtrable dada la redundancia de antenas. Por el contrario, la presencia de un obstáculo, el cual genere una reflexión en la señal que sea transmitida a varios receptores por igual puede generar un alto nivel de degradación del sistema, invirtiendo así el efecto buscado por la redundancia.

Dicho fenómeno particular se conoce como reflexión correlada o “correlated multipath”, y sucede cuando dos o más antenas son influenciadas por la presencia de un obstáculo de la misma forma.

Para evitar o reducir el efecto negativo de este fenómeno se concluye que la distancia entre pares de antenas debe ser mayor o igual a 105 metros. De esta manera, manteniendo las antenas receptoras alejadas entre sí, se evita que dos o más de ellas estén afectadas de igual manera por una misma reflexión, aumentando así la robustez

del sistema.

Habitualmente, el conjunto de antenas receptoras y emisor VDB suelen ubicarse, respetando las distancias declaradas, en una misma zona del aeropuerto. No obstante, en ocasiones no es posible alcanzar los mínimos de seguridad en términos de distancias entre elementos del sistema. En estos casos, es posible repartir el conjunto de antenas por toda el área aeroportuaria, logrando así grandes distancias de separación entre las mismas.

En estos casos, se debe prestar especial atención al cableado que permite la transmisión de la información desde la antena a la unidad de procesamiento, dado que pueden aparecer fenómenos de interferencias o pérdidas de potencia de la señal a lo largo del cableado.

### 5.2.5 Monitoreo de efectos ionosféricos. Distancia máxima de separación

Junto a los mínimos de separación exigidos para mitigar los efectos de reflexiones correladas, los cuales aumentaban el error en pseudodistancia de la estación terrestre  $\sigma_{pr_{gnd,i}}$  se establece una distancia máxima entre antenas requerida para monitorear y corregir los efectos ionosféricos que incrementan el efecto del retardo ionosférico residual  $\sigma_{iono,i}$ .

Con el objetivo de mitigar los efectos ionosféricos en el sistema, el GBAS consta de varias funciones, “Absolute Slant Ionospheric Gradient Monitor” y “Ionospheric Field Monitor” o IFM. Éstas se encuentran aún en desarrollo, dado que se prevé implementarlas en los futuros sistemas GBAS que sirvan a categoría CAT-III.

No obstante, dichos criterios se tendrán en cuenta a la hora de la instalación del sistema de cara a una actualización futura.

El monitoreo del error ionosférico requiere que exista una distancia máxima entre pares de antenas dentro del rango de los 200-400 metros.

Sin embargo, para reducir el impacto y la huella radioeléctrica del sistema dentro del aeropuerto se recomienda optar por tomar el límite menor de dicho rango, de manera que las antenas queden espaciadas entre ellas como máximo una distancia de 200 metros.

Así mismo, la disposición geométrica de las antenas RRA dentro del área debe cumplir unos requisitos. Se debe evitar que estén dispuestas de forma colineal exacta, teniendo una separación linear entre ellas de al menos el orden de la longitud de onda de la señal.

Como se analizó anteriormente, la señal GPS se modula mediante la portadora L1 a 1575.42 MHz, lo que se corresponde con una longitud de onda de 0.19 metros. Es decir, en el caso de se decida de que la distribución de las antenas sea lineal, éstas deben estar desviadas entre sí distancias del orden de unidades de metros.

### 5.2.6 Distancia a zonas públicas

Para finalizar, un último aspecto a la hora de tener en cuenta en el emplazamiento de las GNSS RRA son las interferencias radioeléctricas o RFI (Radio Frequency Interference) que pueden surgir, ya sean intencionadas o no, desde zonas ajenas a la autoridad aeroportuaria.

Generalmente, áreas públicas como autopistas, parkings, etc. son potencialmente fuentes de RFI. Así mismo, el GBAS puede llegar a ser vulnerable ante ataques conocidos como “jamming”.

Dicho fenómeno consiste en la generación de forma local, ilícita e intencionada, de una señal radioeléctrica destructiva. Dicha señal tiene como objetivo interferir con la señal posicionamiento emitida por los satélites GNSS de manera que se impida a los receptores de la señal determinar su posición, interrumpiendo así el funcionamiento del sistema completo.

La robustez del sistema GBAS ante este tipo de ataques viene determinada por parámetros como las características de las antenas RRA, el emplazamiento de las mismas o el número de antenas presentes, siendo posible para el sistema mantener un correcto funcionamiento del mismo incluso cuando una de las antenas se encuentra inoperativa por motivos de interferencias RFI.

En cualquier lugar, se busca emplazar al conjunto de antenas RRA en una posición lo suficientemente protegida de RFI, esto es, suficientemente alejadas de zonas públicas y fuentes de emisión radioeléctricas.

### 5.3 Consideraciones de emplazamiento para antenas VDB

Como se mencionó anteriormente, uno de los elementos protagonistas del subsistema terrestre es la antena VDB o bien, VHF Data Broadcast. Dónde VHF hace referencia a la banda de espectro radioeléctrico en la que se transmite la información (Very High Frequency).

Hasta el momento, se ha hecho referencia exclusivamente a la existencia de una única antena VDB, la cual realiza las funciones de transmisión desde la estación terrestre hasta las aeronaves. No obstante, existe la posibilidad de emplazar una segunda antena VDB que ejerza de receptora.

El objetivo de esta segunda antena consiste en dotar al sistema de capacidad de recepción de la señal VDB que él mismo está emitiendo, de manera que pueda ser muestreada y analizada continuamente en el tiempo para garantizar la calidad de la misma.

No obstante, se trata de una característica avanzada y compleja que se pretende instaurar en los futuros GBAS que sirvan a aproximaciones de precisión de CAT II-CAT III y que aún se encuentran en desarrollo.

Dado que en el presente proyecto versa sobre la implementación de un GBAS CAT I, se considerará que únicamente existe una única antena VDB transmisora, tal como ocurre en la actualidad en los aeropuertos dotados de la tecnología GBAS.

Las consideraciones generales a tener en cuenta se enumeran a continuación:

#### 5.3.1 Restricciones generadas por las superficies limitadoras de obstáculos

En general, la posición de la antena VDB debe respetar las superficies limitadoras de obstáculos (SLO) existentes en el aeródromo. Según hace referencia el Anexo 14 Volumen I de OACI [9], existe la posibilidad de realizar una excepción, en este aspecto, para la instalación de equipos empleados para la ayuda a la navegación, siempre y cuando no sea posible respetar las SLO.

No obstante, estas excepciones están destinadas a las antenas de senda de planeo (G/S antenas) del ILS/MLS. Dado que el emplazamiento de la antena VDB del GBAS es mucho más flexible, OACI no se pronuncia acerca de vulneraciones de las SLO debidas a elementos del GBAS.

A modo de consulta, en el Anexo IV: Superficies limitadoras de obstáculos del presente proyecto se incluye una descripción de las superficies limitadoras de obstáculos definidas en el Anexo 14 de OACI, dado que tendrán un papel fundamental a la hora de seleccionar el emplazamiento de los equipos del GBAS.

#### 5.3.2 Volumen de cobertura antena VDB

Uno de los requisitos principales a la hora de emplazar la antena VDB es la cobertura. Deben cumplirse los volúmenes mínimos de cobertura establecidos por OACI en su Anexo 10 (3), los cuales se presentaron en el apartado 1 del documento.

Dicho criterio establece que la densidad mínima de potencia radiada de  $-99 \text{ dBW/m}^2$ , en consecuencia, la ubicación de la antena debe ser tal que las obstrucciones mediante obstáculos sean las mínimas posibles y, siempre que sea posible, se mantenga una línea de visión directa con la aeronave durante todo momento de la aproximación.

Este valor mínimo de densidad de potencia radiada se traduce de forma práctica en que la antena VDB debe de situarse dentro de un radio de 3NM (aproximadamente 5,5 km) desde cualquiera de las cabeceras a las que sirva.

#### 5.3.3 Máxima densidad de potencia admisible

Si bien los requisitos mínimos de cobertura establecen una distancia máxima desde la antena VDB hasta las cabeceras de pista, también existe un requisito de máxima densidad de potencia de la señal admisible por los receptores de las aeronaves. Esto se traduce en una distancia mínima entre antena VDB y zonas operacionales por las que circulen aeronaves.

Esta distancia mínima entre antena VDB y aeronave asegura que los receptores de a bordo de las aeronaves no saturen y en consecuencia sufran sobrecalentamientos, conocido en anglosajón como “burnout failure”.

OACI, en su Anexo 10 [4] traduce esta restricción en un requisito máximo de densidad de potencia de 20dBW/m<sup>2</sup>, que a su vez se convierte, de una forma más práctica, en una distancia mínima de 7 m desde la antena VDB transmisora hasta cualquiera de las áreas operacionales por las que rueden o sobrevuelen aeronaves (plataforma, calles de rodaje, pista o senda de aproximación/despegue). No obstante, se suele emplear una distancia mayor, del orden de los 80m.

A pesar de ello, en numerosas ocasiones las restricciones impuestas por las SLOs son más exigentes que las de máxima densidad de potencia admisible, quedando estas últimas supeditadas a las primeras.

### 5.3.4 Local Object Consideration Area (LOCA) de antenna VDB

Al igual que ocurría con las antenas RRA, las VDB deben disponer a su alrededor de un área LOCA que restrinja la presencia de objetos causantes de potenciales interferencias que degraden la calidad del sistema.

A pesar de ello, al contrario que ocurría en las LOCA de las RRA, donde dicho área se quedaba definido como un requisito normativo por OACI, dentro del Anexo 10 [4] no se encuentra una definición similar para las antenas VDB. OACI establece que las dimensiones de las LOCA deben ser determinadas por el fabricante.

## 5.4 Consideraciones de emplazamiento de la unidad de procesamiento

Dentro del subsistema terrestre, cuando se hace mención a la unidad de procesamiento se refiere a la caseta que contiene todo el conjunto de equipos de recepción, procesamiento y transformación de la señal GBAS. En resumidas cuentas, el papel de esta unidad es actuar como “cerebro” del sistema. Comúnmente, a la caseta de la unidad de procesamiento se la conoce por su nombre inglés “shelter”.

Se trata del elemento del subsistema terrestre con menores restricciones a la hora del emplazamiento. No obstante, es necesario considerar aspectos como:

- Aspectos de seguridad: La caseta actúa como barrera física entre los equipos de procesamiento que contiene y el exterior. De esta forma, se recomienda emplazarla dentro del recinto aeroportuario, en una zona vigilada y debidamente protegida.
- Superficies limitadoras de obstáculos: Al igual que ocurre con el resto de obstáculos, la “shelter” debe respetar las OLS del aeropuerto.
- Condiciones climatológicas y variaciones estacionales: Los equipos de procesamiento de señal ubicados en el interior requieren un rango tanto de temperatura como de humedad determinado para su correcto funcionamiento. Se ha de tener en cuenta que, en el caso de que las condiciones climatológicas del aeropuerto lo requieran, la caseta deberá estar debidamente acondicionada.
- Conexiones con antenas RRA y VDB: Los equipos de la unidad de procesamiento deberán estar conectados tanto a las antenas RRA como a la antena VDB mediante cableado subterráneo debidamente protegido ante interferencias electromagnéticas. Con el objetivo de minimizar las pérdidas de tensión a lo largo del cableado, y a su vez de minimizar costes, se recomienda que la caseta se sitúe en una zona próxima, dentro de las posibilidades existentes, a las antenas. Es decir, respetando las LOCA de las mismas.

# 6 EMPLAZAMIENTO DEL SUBSISTEMA TERRESTRE GBAS EN EL AEROPUERTO DE GRAN CANARIA

---

Una vez analizados los requisitos recomendados a respetar a la hora de ubicar cada uno de los elementos del sistema, se procede a particularizar la situación para el Aeropuerto de Gran Canaria. Debido a las limitaciones que se tienen a la hora de elaborar un proyecto académico de este calibre, no será posible realizar un estudio detallado del emplazamiento del sistema, como comúnmente se lleva a cabo, previo a la instalación, en los aeropuertos dotados de GBAS.

No obstante, se introducirán una serie de consideraciones y conceptos generales en las que se describirá como se lleva a cabo este proceso en la realidad.

Una vez que hayan sido adquiridos esta serie de conceptos por el lector, se llevará a cabo un análisis de cómo se encuentran emplazados actualmente los sistemas existentes en diferentes aeropuertos europeos

Mediante dicho análisis será posible, partiendo del ejemplo del resto de aeropuertos, de realizar un benchmarking para el caso particular del aeropuerto canario.

Finalmente, se determinará la posición final de cada uno de los elementos del GBAS justificando el criterio adoptado para cada uno de ellos.

## 6.1 Conceptos generales

El proceso de selección de emplazamiento es un proceso complejo en el que se requieren una serie de etapas consistentes en estudios y análisis tanto teóricos como prácticos que determinan, como resultado, la zona y configuración óptima para emplazar los elementos. Estas etapas se pueden resumir de la siguiente manera:

- Selección de áreas potenciales en función del layout del aeropuerto.
- Análisis de la calidad señal GPS en dichas zonas candidatas.
- Estudio del nivel de interferencia radioeléctrica en cada zona candidata.

A pesar de que a continuación se presentan cada una de las etapas, dados los recursos de los que se dispone, dentro del alcance de este proyecto únicamente se aplicará la primera de las etapas.

### 6.1.1 Áreas potenciales de instalación

En este primer proceso, se busca como objetivo determinar una o varias zonas candidatas para la instalación del conjunto de elementos del GBAS.

La instalación completa se suele ubicar, por cuestiones operativas, en un mismo área reducido, dentro de los requisitos de emplazamiento presentados en el apartado anterior. Típicamente se definen 2 ó 3 zonas candidatas potenciales, en función de los posibles obstáculos existentes, la distancia a las cabeceras a las que se dará servicio, las servidumbres de aeródromo existentes y el espacio disponible dentro del recinto aeroportuario.

Dichas zonas candidatas deberán cumplir con los requisitos de emplazamiento del sistema que se analizaron en profundidad en el apartado anterior, de manera que se garantice un correcto funcionamiento del sistema en el caso de que la instalación se lleve a cabo en dicha zona. Se trata, no obstante, de la etapa más particular dado que cada aeropuerto posee un layout propio y en muchas ocasiones totalmente diferente al resto.

### 6.1.2 Análisis de la señal GNSS

Una vez determinados los candidatos se procede a realizar una serie de tomas de datos analizando instalando antenas receptoras RRA temporales en cada una de las zonas a estudiar. Se analiza la potencia, cobertura y precisión de la señal satélite obtenida a lo largo del día, así como la aparición de posibles efectos de multipaths.

De este modo, mediante diferentes técnicas es posible determinar cuál de las zonas potenciales de instalación posee una ubicación privilegiada que le permite recibir una mejor señal GNSS, lo cual propiciará un mejor funcionamiento global del sistema. Generalmente, dada la extensión del área aeroportuaria, las variaciones de la calidad en la señal son significativamente pequeñas.

### 6.1.3 Medida de la contaminación radioeléctrica

Tras analizar la calidad de la señal en cada uno de los posibles emplazamientos se estudia el nivel contaminación radioeléctrica dentro de la banda de señal del GPS ( $1.57542 \text{ GHz} \pm 10\text{MHz}$ ). De esta manera es posible determinar la zona menos susceptible a interferencias producidas por todos los sistemas radioeléctricos, ya sean de tipo aeronáutico o no, en el entorno de esta.

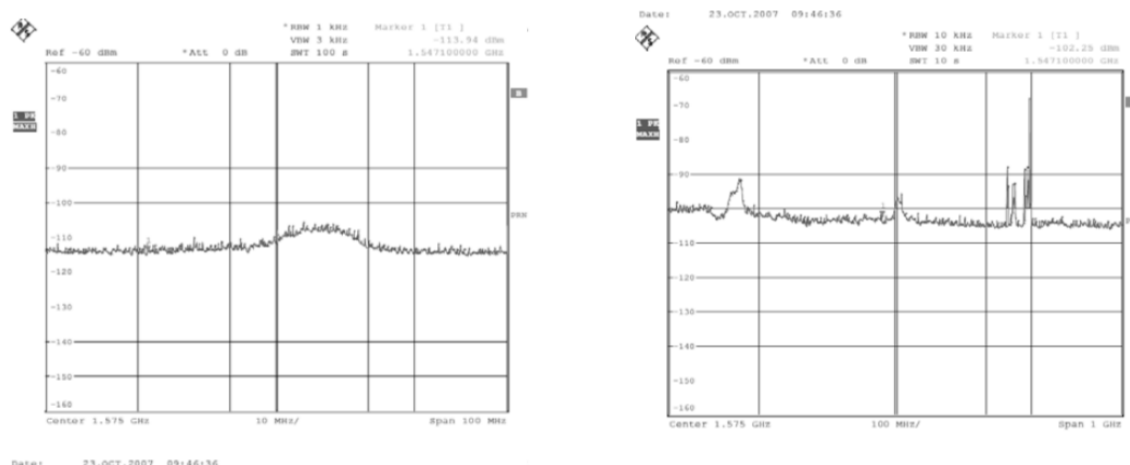


Figura 6-1. Medidas del nivel de contaminación radioeléctrica en el Aeropuerto de Braunschweig Wolfsburg.  
[10]

## 6.2 Benchmarking. Instalaciones GBAS en otros aeropuertos.

Una vez establecidos la serie de conceptos generales para la instalación del GBAS dentro del recinto aeroportuario del Aeropuerto de Gran Canaria, se procederá a realizar un benchmarking.

Este benchmarking consistirá en analizar, en una serie de aeropuertos que actualmente están dotados y operan con GBAS CAT I, el layout que poseen en cuanto a la distribución de los correspondientes elementos del sistema. De esta forma, será posible comprobar la validez el modelo de propuesta para el emplazamiento del sistema en el Aeropuerto de Gran Canaria.

Los aeropuertos a analizar serán 4. Cada uno de ellos está dotado con una instalación GBAS en pleno funcionamiento, que da servicio a las aeronaves en aproximación de precisión Categoría I. Estos aeropuertos son los siguientes:

- Aeropuerto de Málaga – Costa del Sol. Málaga (España)
- Bremen International Airport – Bremen (Alemania)
- Frankfurt am Main Airport – Frankfurt (Alemania)
- Sydney Kingsford Smith Airport – Sydney (Australia)



Como se recalcó anteriormente, en la realidad y a la hora de validar el layout son necesarios otra serie de estudios y análisis que validan la calidad de la señal en función del layout propuesto. No obstante, y dado que no se dispone de los recursos necesarios para llevar a cabo dicha serie de validaciones, se optará por basarse, con el objetivo de validar la propuesta, en el benchmarking que se desarrolla a continuación.

### 6.2.1 Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol

El Aeropuerto de Málaga – Costa del Sol, ubicado como su propio nombre indica en la ciudad andaluza de Málaga, es el cuarto aeropuerto por número de pasajeros de España [3]. Con un total de 19 millones de pasajeros en el año 2018, posee un volumen de tráfico relativamente similar al que se dio en el Aeropuerto de Gran Canaria con 13,5 millones en 2018.

Del mismo modo, posee una distribución del campo de vuelos relativamente similar, en el sentido de que dispone de dos pistas, aunque estas no son paralelas, aunque si con relativa paridad en la orientación (13/31 y 12/30).

El aeropuerto malagueño cuenta con un sistema GBAS que opera desde el año 2014, siendo uno de los aeropuertos comerciales pioneros en Europa y en el mundo en implantar este sistema.

La instalación terrestre del GBAS en Málaga consta con un total de 4 antenas RRA, una antena VDB y una caseta en la que se aloja la unidad de procesamiento. El área en la que se ubican cada uno de dichos elementos es el mismo, quedando todos concentrados en la zona próxima a la cabecera 13.

De esta forma, emplazando todas las antenas y sistemas en un mismo lugar, se consigue reducir el cableado necesario de la instalación, mitigando así las pérdidas de señal que se puedan producir a través de la red.



Figura 6-2. Área de instalación GBAS en AGP

Como se verá en los sucesivos aeropuertos que se analizarán, la de situar todos los elementos del subsistema terrestre en una misma área reducida es una práctica común.

Si se analiza con más detalle la instalación del Aeropuerto de Málaga se puede concluir lo siguiente.

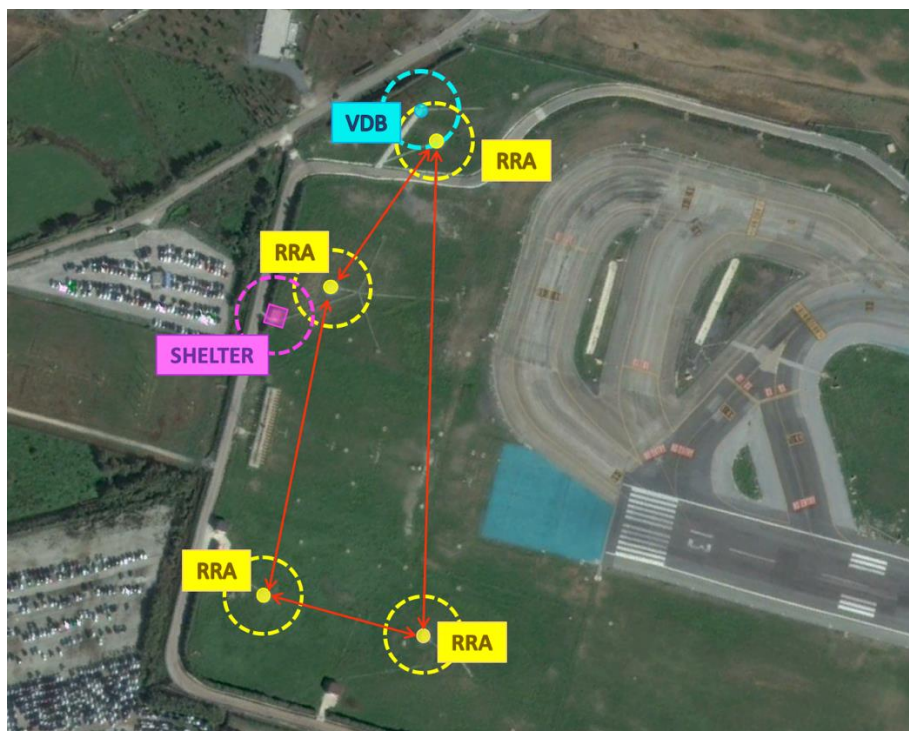


Figura 6-3. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en AGP

En primer lugar, llama la atención la asimetría que existe entre las posiciones de las antenas RRA. Esto es debido a que se ha intentado ubicar las mismas lo más alejado posible de las zonas de movimiento de aeronaves (Calles de rodaje, apartaderos de espera y pista).

De este modo, las antenas quedan próximas al vial perimetral del aeropuerto. Al ser la altura de los vehículos que transitan por el vial sustancialmente inferior a la de las aeronaves, la inclusión dentro de la LOCA de cada antena RRA por estos vehículos es algo inusual.

Por último, se aprecia como la antena VDB y la shelter se ubican separadas una de la otra. En concreto, la VDB la encontramos muy próxima a una de las antenas RRA.

Dicha proximidad entre ambos elementos no supone un problema de interferencias en su funcionamiento dado que la antena VDB trabaja en la banda de frecuencias VHF (30-300 MHz) mientras que las antenas RRA trabajan con la señal L1 de GPS que se emite a 1575.42 MHz, y por tanto, dentro de la banda UHF (300-3000 MHz).

La superficie total que ocupa la instalación del subsistema terrestre GBAS en AGP es de 25.000m<sup>2</sup> aproximadamente.

### 6.2.2 Aeropuerto Internacional de Bremen

El Aeropuerto Internacional de Bremen se ubica en el área metropolitana de la ciudad de Bremen, dentro del mismo Estado de Bremen. En el año 2018 se situó como el 12º aeropuerto alemán por número de operaciones IFR acumulando un total de 31.198. [11]

En el año 2012, el Aeropuerto de Bremen, a través del operador de navegación aérea DFS Deutsche Flugsicherung, fue el primero del mundo en proveer servicios de aproximación de precisión CAT I a vuelos civiles regulares mediante GBAS. Actualmente, es uno de los GBAS más consolidados dentro de Europa, a la espera de obtener la certificación para operar en CAT II y CAT III a comienzos de la próxima década.

Analizando la instalación del sistema dentro del aeropuerto alemán, se observa que de nuevo la totalidad de esta se encuentra emplazada en una misma zona.





Figura 6-4. Área de instalación GBAS en BRE

Analizando desde cerca la distribución de la instalación se observa lo siguiente.

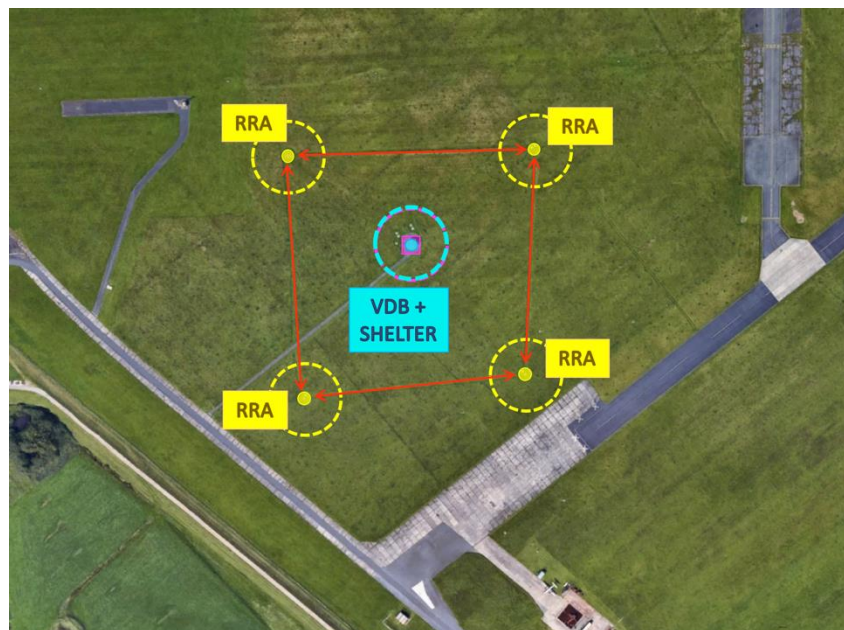


Figura 6-5. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en BRE

La distribución de los elementos es totalmente simétrica, estando las antenas RRA situadas en los extremos de un cuadrilátero. Aproximadamente en el centro del mismo, se ubican tanto la shelter como la antena VDB.

Se trata de una configuración preferente a la hora de instalar el sistema. En primer lugar, la longitud de cable existente entre las RRA y los sistemas de procesamiento dentro de la shelter es la mínima posible y además idéntica lo que hace que se produzcan mínimas pérdidas de transmisión a través del cableado.

Por otro lado, la antena VDB se sitúa en el mismo lugar que la shelter, reduciendo igualmente el cableado necesario. Del mismo modo, esta antena se instala en el techo de la caseta, aumentando así su altura base y reduciendo el riesgo de posibles interferencias en la señal debidas a obstáculos que se desplacen por la superficie del aeropuerto.

Dadas las características del Aeropuerto de Bremen, el cual posee una amplia extensión de terreno más allá del área de movimiento, hace que se pueda llevar a cabo esta instalación optimizada.

La superficie que ocupa la instalación del subsistema terrestre GBAS en BRE es de 60.000m<sup>2</sup> aproximadamente.

### 6.2.3 Aeropuerto de Frankfurt del Meno

El Aeropuerto Internacional de Frankfurt del Meno, en alemán “Rhein-Main-Flughafen”, es uno de los HUB’s europeos con mayor volumen de tráfico. Con un total de 511.844 operaciones IFR en 2018 [11], se sitúa como el mayor aeropuerto del país germano. Del mismo modo se sitúa el primero en la lista alemana por número de pasajeros anuales.

En 2018 registró un total de 69.510.269 de pasajeros [12] situándose como el primer aeropuerto en números de toda Alemania.

Dado sus altos volúmenes de tráfico, se trata del aeropuerto con mayor número de operaciones IFR al que un sistema GBAS da servicio. Su gran número de vuelos, junto a sus 4 pistas hacen de este aeropuerto un entorno ideal para la instalación de un GBAS.

El sistema se encuentra emplazado en las cercanías de la cabecera 18, de manera que la distancia a las 8 cabeceras de las que dispone el aeropuerto no sea muy elevada. Se recuerda que el requisito de distancia máxima desde la instalación a cualquier cabecera es de 5000 metros.

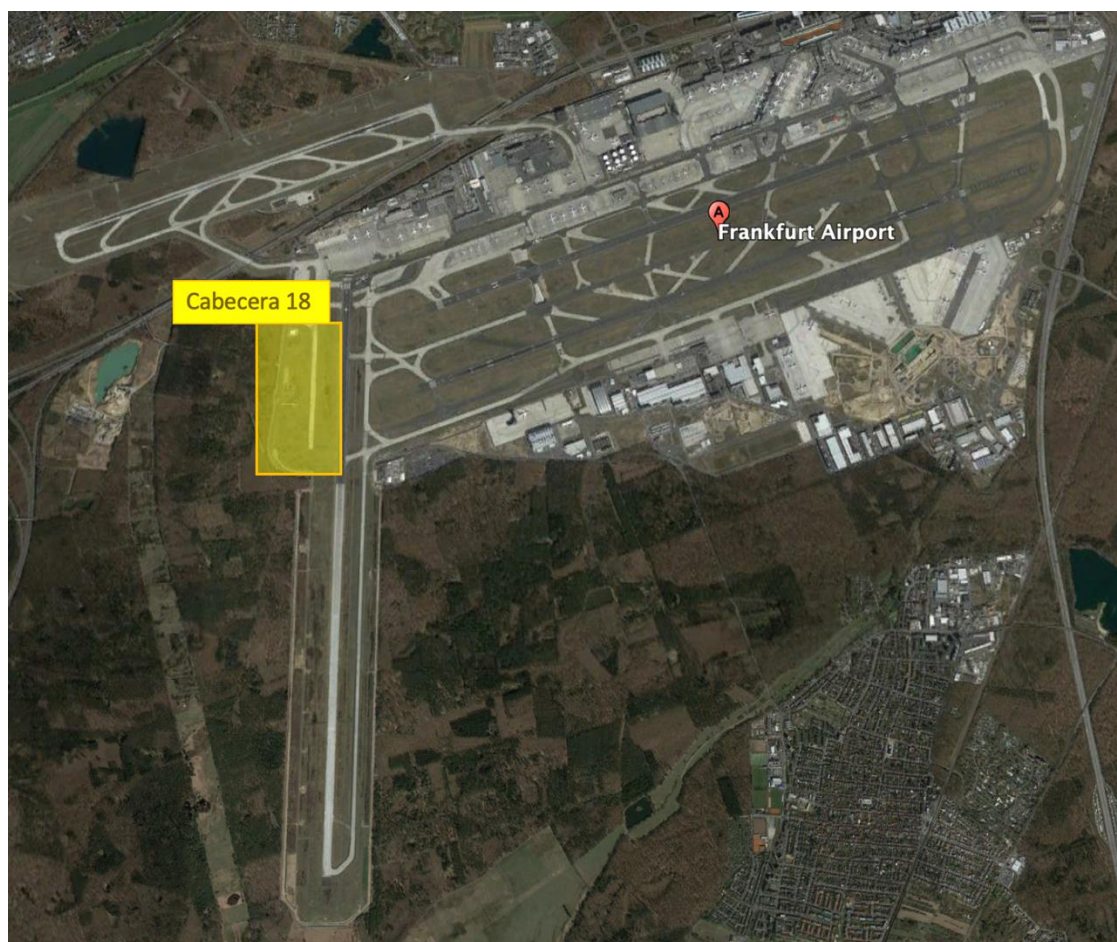


Figura 6-6. Área de instalación GBAS en FRA

Se trata de un área con una gran extensión longitudinal que, sin embargo, se encuentra limitada transversalmente. Por dicho motivo, la instalación posee una particularidad, y es que las antenas RRA se encuentran situadas prácticamente linealmente.

Esto hace que exista una notable distancia entre las antenas que se encuentren en los extremos de la línea, lo cual, al contrario que sucedía en Bremen, no es aconsejable. No obstante, dado el layout del aeropuerto es necesario adoptar esta configuración, haciendo hincapié de nuevo a que en el emplazamiento de los sistemas



varía sustancialmente en función de las características físicas del aeropuerto.

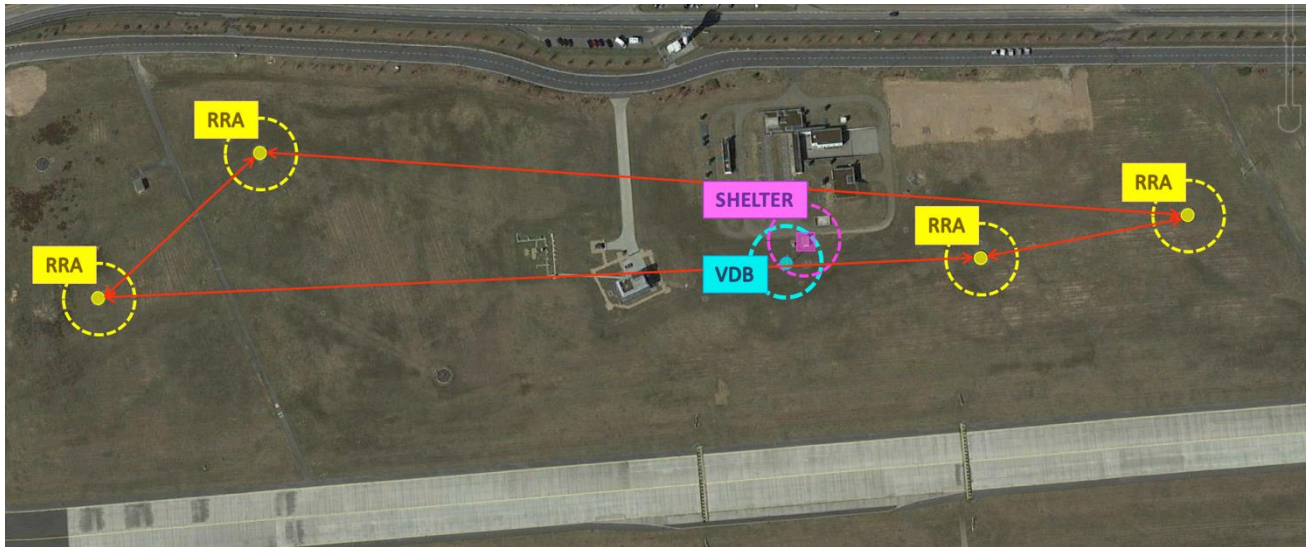


Figura 6-7. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en FRA

Como se ha mencionado, la forma en la que se ubican las RRA hace que la distancia entre pares llegue a ser notable.

Por el contrario, la shelter junto con la antena VDB se sitúan muy próximas la una a la otra. En este caso, en Frankfurt no se instala la VDB en el tejado de la caseta.

La superficie total que ocupa la instalación del subsistema terrestre GBAS en FRA es de 53.000m<sup>2</sup> aproximadamente.

#### 6.2.4 Aeropuerto Internacional de Sydney-Kingsford Smith

El Aeropuerto Internacional de Sydney, también conocido como Kingsford Smith Airport, posee un GBAS implantado por Honeywell y en funcionamiento desde mediados de 2014. Es uno de los aeropuertos de más reciente implantación del sistema.

En el año natural 2018, el aeropuerto australiano registró un total de 320.436 movimientos [13]. Del mismo modo, con un total de 44.035.329 pasajeros en el año 2017, el Aeropuerto de Sydney se sitúa como el principal aeropuerto de toda Oceanía.

Se trata de un aeropuerto internacional, con un total de 3 pistas y una gran extensión de terreno, aunque limitada por el mar. El subsistema terrestre del GBAS australiano se encuentra situado en una misma zona, anexa a la cabecera 34L y rodeada por el mar. Esto último hace que el número de obstáculos fijos alrededor de la estación sea prácticamente insignificante.

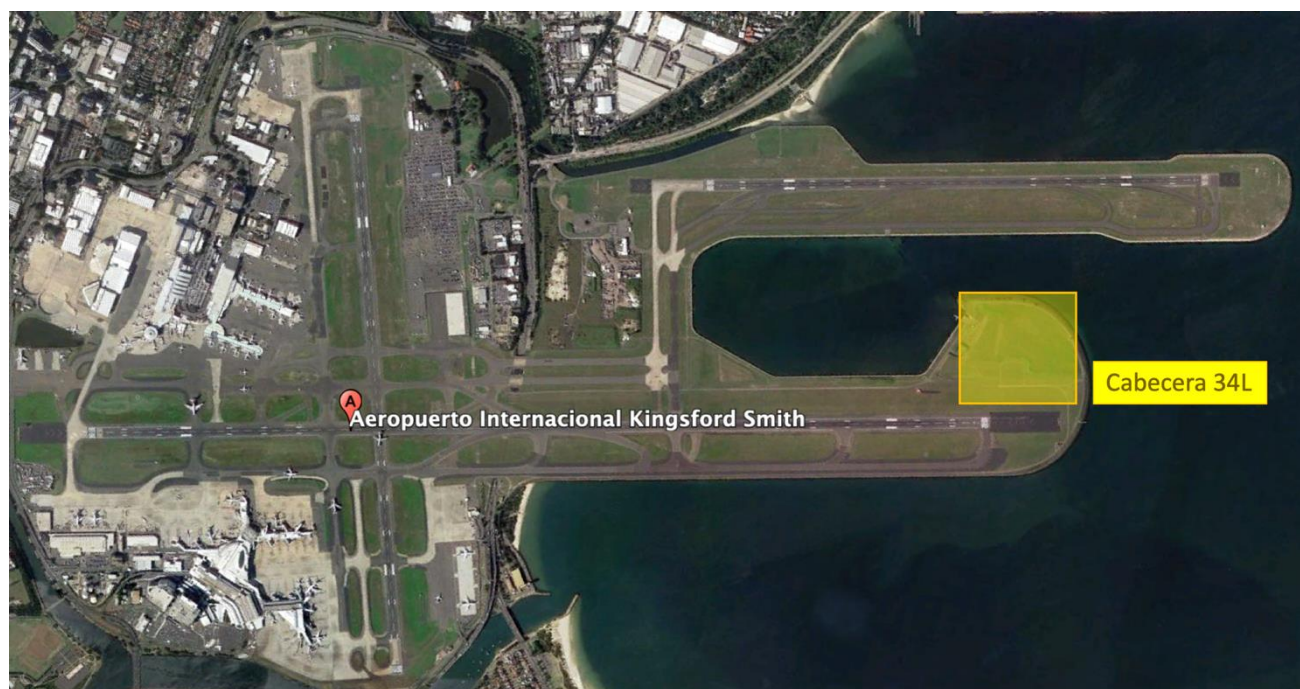


Figura 6-8. Área de instalación GBAS en SYD

Al igual que ocurría en el aeropuerto de la ciudad de Bremen, dada la amplia extensión de terreno que se dispone en dicha zona, lejos de las rutas de rodaje de las aeronaves, es posible instalar una configuración optimizada de los elementos del sistema.

Como se observa en la siguiente imagen, las cuatro antenas RRA se ubican formando un cuadrilátero cuasi-regular. Se trata, por tanto, de la mejor configuración posible en términos operacionales del sistema. No obstante, en ocasiones no es posible adoptarla dada la distribución del aeropuerto y la orografía del terreno.

Por otro lado, tanto la antena VDB como la shelter se encuentran emplazadas muy próximas la una a la otra. Una de las posibilidades de emplazamiento de la VDB habría sido encima de la shelter, no obstante, en Sydney se opta por ubicarlas anexasmente. Esto permite una mayor facilidad a la hora de realizar el mantenimiento de la antena para lograr un correcto funcionamiento del sistema.

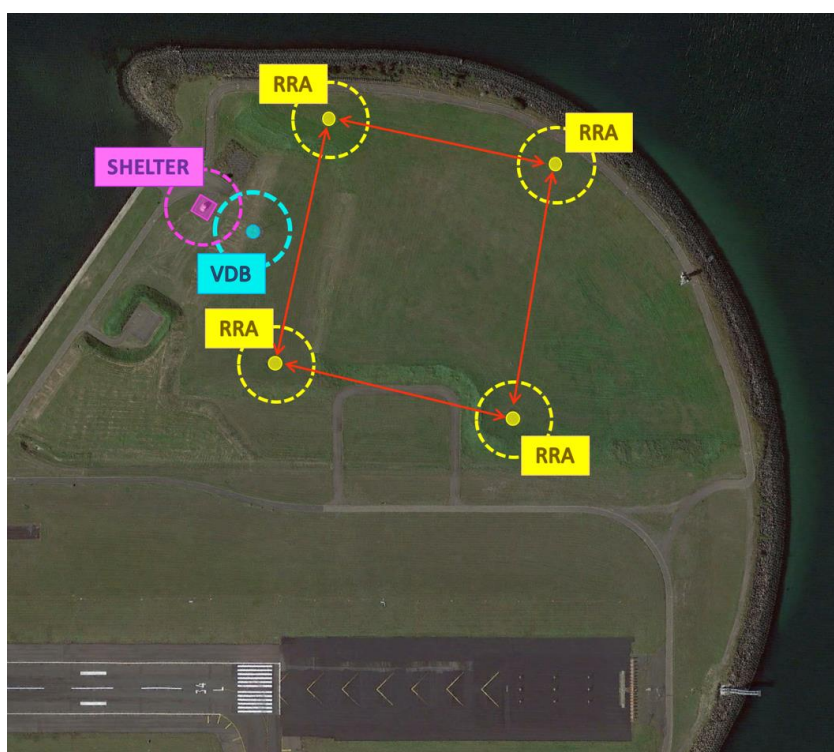


Figura 6-9. Distribución de elementos del subsistema terrestre GBAS en SYD

La superficie total que ocupa la instalación del subsistema terrestre GBAS en SYD es de 70.000m<sup>2</sup> aproximadamente.

A continuación, se resume la información extraída del análisis.

Aeropuerto	Superficie de la instalación	Distribución de las RRA	VDB y Shelter coincidentes
Málaga	25.000 m <sup>2</sup>	Irregular	No
Bremen	60.000 m <sup>2</sup>	En cuadrado	Si
Frankfurt	53.000 m <sup>2</sup>	Irregular	Si
Sydney	70.000 m <sup>2</sup>	En cuadrado	Si

Tabla 6-1. Características de las instalaciones GBAS en otros aeropuertos

### 6.3 Emplazamiento en el Aeropuerto de Gran Canaria

Como hemos podido comprobar analizando la serie de aeropuertos anteriores en los que se implementa el GBAS, la distribución de los diferentes elementos (RRA, VDB y shelter) del subsistema terrestre varía notablemente de unos a otros.

El principal motivo de esta variación son las particularidades existentes en cada uno de los aeropuertos, en cuanto a layout del área de movimiento, la orografía del terreno y el espacio disponible dentro del vallado perimetral del aeródromo.

Según los análisis anteriores se han podido determinar las siguientes consideraciones a la hora de emplazar el sistema:

1. La instalación completa del sistema se ubica siempre en una misma zona, reduciendo en la medida de lo posible las distancias entre elementos.
2. Según los aeropuertos analizados, se requiere como mínimo un total de 25.000m<sup>2</sup> de superficie para la instalación
3. Las antenas (RRA y VDB) deben de ubicarse lo suficientemente alejadas del área de movimiento para evitar inclusiones de obstáculos móviles (aeronaves) dentro de las correspondientes LOCAs.
4. La instalación óptima, en caso de que el punto 3 lo permita, es un cuadrilátero regular en el que en cada extremo de este se ubique una de las 4 RRA.
5. La antena VDB y la shelter deben de emplazarse anexas la una junto a la otra, en caso de que el punto 3 lo permita, para reducir pérdidas de señal a través del cableado.

#### 6.3.1 Extensión aeroportuaria

Una vez adquiridos los conceptos y consideraciones necesarias para emplazar con criterio el sistema, se procede a analizar el caso particular del Aeropuerto de Gran Canaria.

El aeropuerto insular es uno de los puntos estratégicos del ejército del aire, tanto por motivos de soberanía y control del archipiélago como por motivos geográficos entre los que está la cercanía a África y en concreto al Sáhara. Es por ello, que el aeropuerto es compartido tanto por vuelos civiles como por militares. Al oeste de la pista 03R/21L se encuentra la Base Aérea de Gando. Dicha base posee acceso directo a la pista anteriormente mencionada, la cual suele ser la mayormente empleada en operaciones aéreas militares.

Dicha base pertenece al Ejército del Aire y en última instancia al Ministerio de Fomento y en consecuencia, queda fuera de los límites aeroportuarios civiles contractualmente pertenecientes a AENA. Por lo tanto, no es posible instalar sistemas de ayuda a la navegación de uso civil en la misma.

En consecuencia, las posibilidades de emplazamiento del GBAS se reducen quedando así dos posibles opciones dentro del campo de vuelos. La zona sur adyacente a las cabeceras 03L-03R y la zona norte anexa a las cabeceras 21L-21R.

En la siguiente ilustración se muestra en amarillo los límites civiles del Aeropuerto de Gran Canaria pertenecientes contractualmente a AENA. En rojo los límites de la Base Aérea de Gando pertenecientes al Ejército del Aire.

Como se puede observar, las dos zonas que únicamente pueden ser potenciales para la instalación del sistema son:

- Zona Sur. Con una extensión aproximada de 200.000m<sup>2</sup>
- Zona Norte. Con una extensión aproximada de 25.000m<sup>2</sup>





Figura 6-10. Zonas de potencial emplazamiento del GBAS en LPA

Salta a la vista como la zona norte posee unas dimensiones notablemente inferiores a la zona sur. Se trata de un espacio reducido que limita las posibilidades de instalación, por lo que a priori parece más desfavorable.

Analizando en detalle se determina que la proximidad del límite aeroportuario (línea amarilla) al margen de la calle de rodaje S-7, la cual conecta ambas cabeceras 21L y 21R, es apenas de 200 metros, lo que hace prácticamente imposible ubicar las antenas RRA de otra forma que no sea lineal y cercana al límite del aeropuerto.

Dicha opción resulta igualmente inviable dado que el espacio para emplazar la línea de cuatro antenas es de 380 metros, lo que viola los requisitos de distancia entre RRA descritos en el capítulo anterior. Del mismo modo, la instalación ocuparía parte de la RESA de la pista 03L, lo cual no está permitido según las especificaciones de certificación de aeropuerto de EASA [14].



Figura 6-11. Zona norte de potencial emplazamiento del GBAS en LPA

Por el contrario, la zona denominada “Zona Sur” posee una extensión de terreno notablemente mayor, cabiendo un mayor número de posibilidades de emplazar las antenas y la caseta, respetando los requisitos que exige la normativa, así como las servidumbres tanto de aeródromo como radioeléctricas existentes.

Así mismo, la distancia desde las cabeceras 03R y 03L hasta el límite aeroportuario es de aproximadamente 650 metros, suficiente para colocar las antenas lo suficientemente distanciadas del paso de las aeronaves, haciendo

que éstas no penetren como objetos móviles dentro de la LOCA.



Figura 6-12. Zona sur de potencial emplazamiento del GBAS en LPA

En consecuencia, no cabe más que una posibilidad viable a la hora de la toma de decisión del área de instalación del sistema.

El GBAS del Aeropuerto de Gran Canaria se instalará en la zona sur del mismo, adyacente a las cabeceras 03L y 03R, y dentro del límite aeroportuario civil.

### 6.3.2 Análisis de la zona de emplazamiento adoptada

Una vez determinada la zona en la que se va a realizar la instalación de todos los elementos del subsistema, es necesario verificar que dicha instalación cumpla con la normativa establecida por la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), en su documento CS-ADR-DSN [14]. Dicha normativa, en términos de emplazamiento de nuevos obstáculos más allá del extremo de la cabecera de pista, dictamina que se deben respetar:

- Runway End Safety Areas (RESA)
- Obstacle Limitation Surfaces (OLS)
- Zonas críticas/sensibles de ILS

#### 6.3.2.1 RESAs RWY 03L y 03R

Tal y como se especifica en el epígrafe *CS ADR-DSN.C.220: Objects on runway end safety areas* [14], EASA especifica lo siguiente:

*“No fixed object, other than equipment and installations required for air navigation or for aeroplane safety purposes, ..., should be permitted on a runway end safety area.”*

En consecuencia, todos los elementos del GBAS que se instalen deben de quedar fuera de las RESAs de ambas cabeceras, tanto la 03R como la 03L. Las dimensiones de dichas RESAs se encuentran publicadas en el AIP del Aeropuerto de Gran Canaria [15], siendo estas las siguientes.



12. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PISTA									RUNWAY PHYSICAL CHARACTERISTICS	
RWY	Orientación Direction	DIM (m)	THR PSN	THR ELEV TDZ ELEV	SWY (m)	CWY (m)	Franja (m) Strip (m)	OFZ	RESA (m)	RWY/SWY SFC PCN
03L	021.43°GEO 026°MAG	3100 x 45	275507.92N 0152332.43W	THR: 23.7 m / 78 ft TDZ: 23.7 m / 78 ft	No	No	3220 x 300	No	140 x 150	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete PCN 102/F/AW/T SWY: No
21R	201.43°GEO 206°MAG	3100 x 45	275641.68N 0152250.99W	THR: 9.9 m / 33 ft TDZ: INFO NO AVBL	No	60 x 150	3220 x 300	No	140 x 150	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete PCN 102/F/AW/T SWY: No
03R	021.42°GEO 026°MAG	3100 x 45	275505.45N 0152325.26W	THR: 21 m / 69 ft TDZ: No	No	No	3220 x 300	No	140 x 120	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete (1) (2) SWY: No
21L	201.43°GEO 206°MAG	3100 x 45	275639.19N 0152243.85W	THR: 8 m / 27 ft TDZ: No	No	60 x 150	3220 x 300	No	140 x 150	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete (1) (2) SWY: No

Figura 6-13. Características físicas de las pistas del Aeropuerto de Gran Canaria. Fuente: ENAIRE [15]

Como se observa, las dimensiones de las RESAs son de 140x150m y 140x120m para las cabeceras 03L y 03R respectivamente. Dichas RESAs se extienden desde el extremo de la franja de cada correspondiente pista, las cuales poseen unas dimensiones de 3220x330m para las cuatro pistas. En la siguiente imagen se representan a modo esquemático el área ocupada por ambas franjas mencionadas.

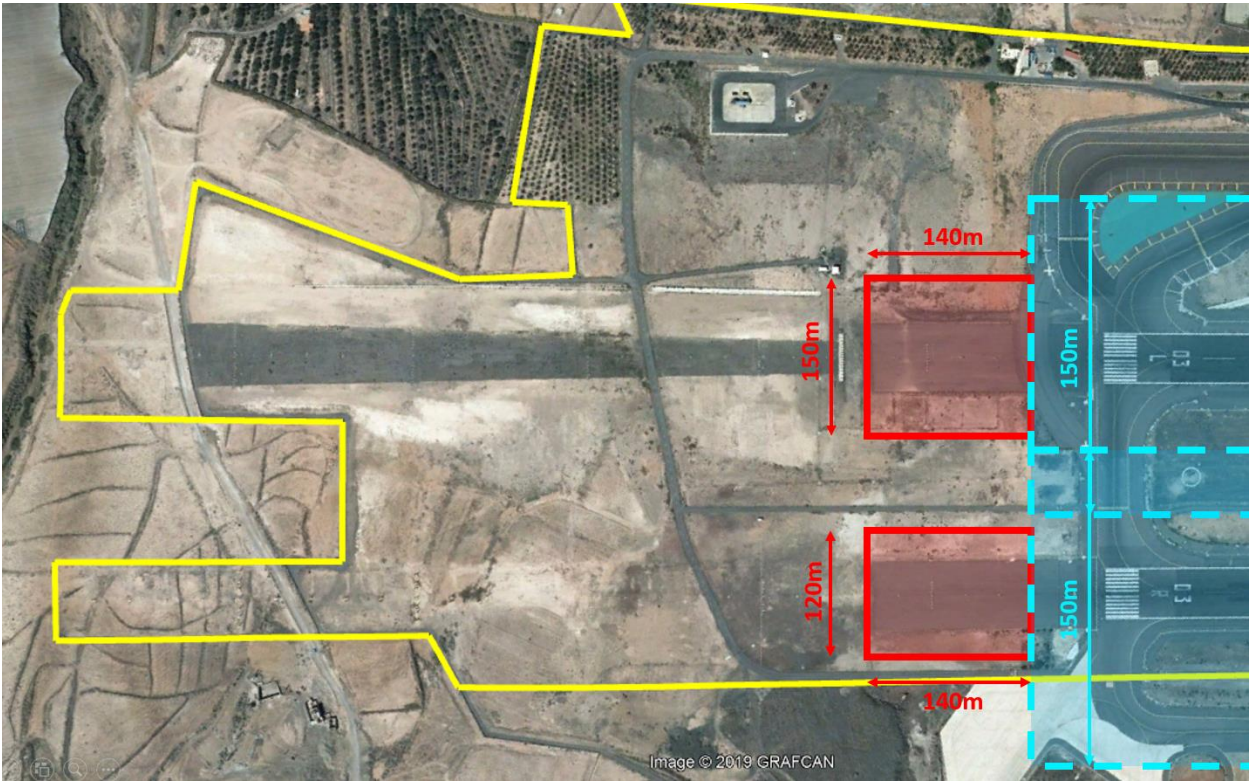


Figura 6-14. RESA y franjas de pista del Aeropuerto de Gran Canaria. Cabeceras 03L y 03R.

Como se observa, las dimensiones de las RESAs son considerablemente reducidas respecto al área disponible para la instalación, la cual debe ser suficiente.

### 6.3.2.2 Superficies limitadoras de obstáculos (OLS)

Las Superficies Limitadoras de Obstáculos u OLS determinadas por EASA en el documento CS-ADR-DSN Issue 4 [14], equivalen a las servidumbres aeronáuticas de aeródromo, tal y como se publican el Real Decreto 297/2013, de 26 de abril, de Servidumbres Aeronáuticas [16].

Las servidumbres aeronáuticas se definen como aquellas superficies alrededor de los aeródromos y aeropuertos que, restringen las construcciones, instalaciones u otro tipo de obstáculos en los mismos, de manera que garanticen que las aeronaves pueden despegar o aterrizar con seguridad.

En el Anexo IV: Superficies limitadoras de obstáculos, las del presente documento se desarrolla una explicación exhaustiva de los tipos de servidumbres aeronáuticas según lo expuesto en el Real Decreto 297/2013 [16] y el Real Decreto 584/72 [17].

Las servidumbres aeronáuticas presentes en el aeropuerto de Gran Canaria se encuentran publicadas por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea. Una representación de las mismas en el entorno de la zona de interés se muestra a continuación.

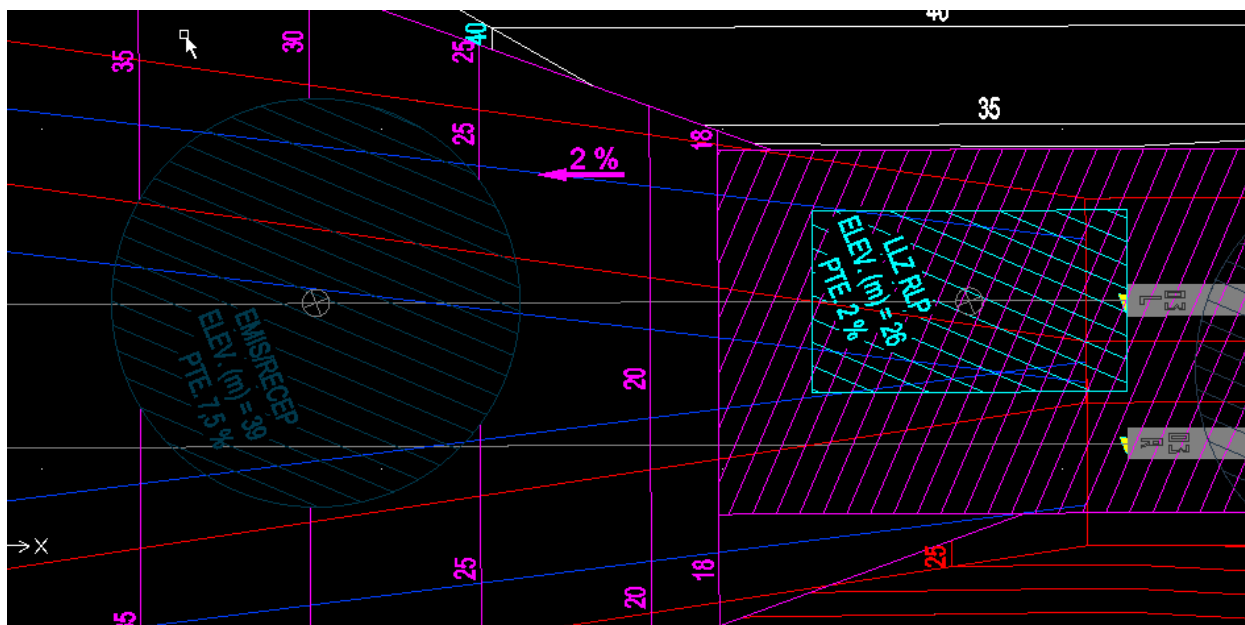


Figura 6-15. Servidumbres aeronáuticas en el Aeropuerto de Gran Canaria. Zona de interés.

Se observa como en la zona conviven distintos tipos de servidumbres:

- Servidumbre radioeléctrica del Localizador del ILS (LLZ) de la cabecera 03L. En color azul cian.
- Servidumbre radioeléctrica de la Senda de Planeo del ILS (GS) de la cabecera 03L. En color magenta.
- Servidumbre de aeródromo de transición de pistas 03L y 03R. En color rojo.
- Superficie de subida al despegue de pistas 21R y 21L. En color azul oscuro.
- Servidumbre radioeléctrica de emisor/receptor radioeléctrico. En color gris.

No obstante, debido a las características topográficas de la zona, existe una parte de dichas servidumbres que se ve vulnerada por el propio terreno, como se observa en la siguiente imagen.





Figura 6-16. Servidumbres aeronáuticas en el Aeropuerto de Gran Canaria. Vulneración por terreno.

Se trata de una situación particular que posee el aeropuerto. Tanto la servidumbre del Localizador (LOC-03L) de la cabecera 03L, como la de la Senda de Planeo (GP-03L), así como las superficies de aproximación de ambas cabeceras 03L y 03R se ven en ciertas zonas vulneradas por el propio terreno circundante, como se refleja en los Planos de Manual de Aeródromo del aeropuerto.

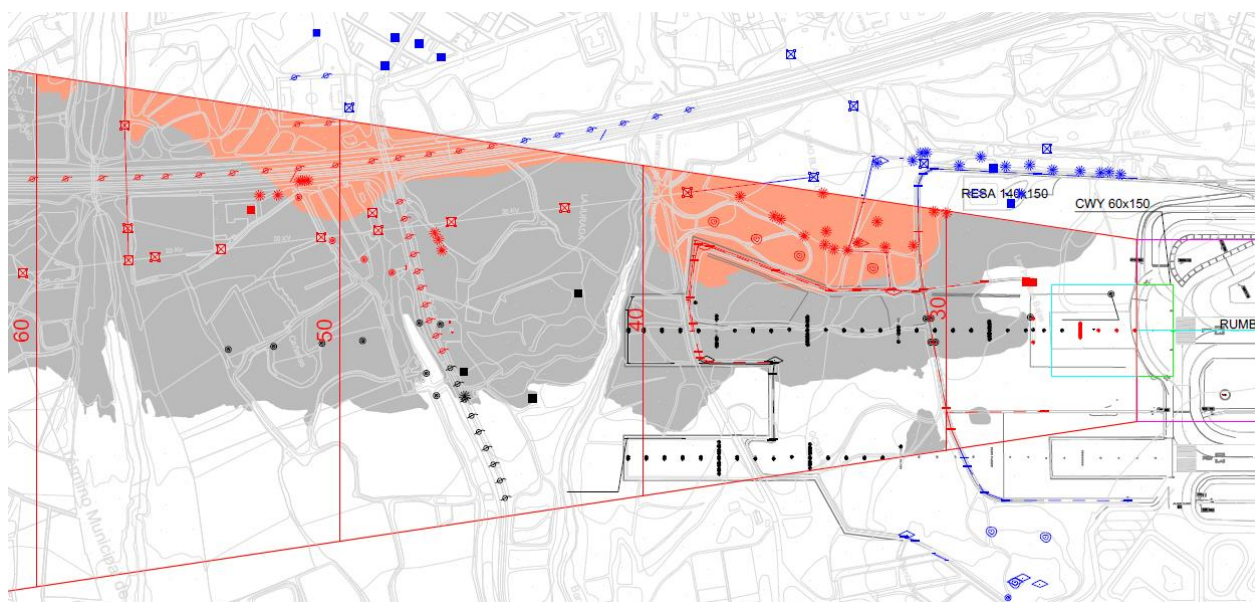


Figura 6-17. Superficie de aproximación cabecera 03L. Vulneración por terreno. Vista en planta.

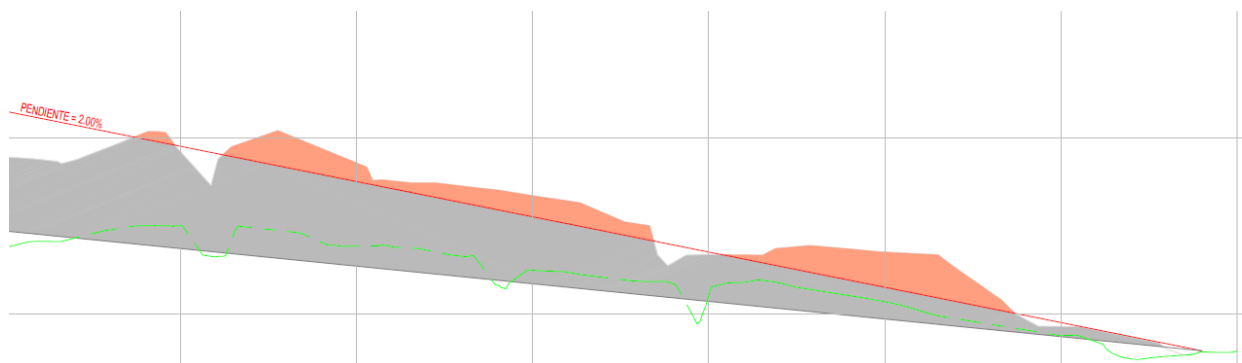


Figura 6-18. Superficie de aproximación cabecera 03L. Vulneración por terreno. Vista de perfil.

Cohherentemente, dichas zonas aparecen reflejadas dentro del Ítem 10 del AIP del Aeropuerto de Gran Canaria [15] “Obstáculos de aeródromo”, siendo identificados como obstáculos mediante la designación “Cota/Natural Highpoint”.

En consecuencia, a la hora de emplazar los elementos del GBAS, los cuales se encuentren sobre las zonas de terreno que penetran en las servidumbres, será necesario solicitar la aceptación de la instalación por parte de AESA, tal y como se enuncia en el Real Decreto 297/2013 de Servidumbres Aeronáuticas [16].

*“La Autoridad Nacional de Supervisión Civil (AESA) o el órgano competente del Ministerio de Defensa, en el ámbito de sus respectivas competencias, podrán autorizar con carácter excepcional la construcción de edificaciones o instalaciones en aquellos casos en que, aun superándose los límites establecidos por las servidumbres aeronáuticas, quede acreditado, a juicio del órgano competente, que no se compromete la seguridad, ni queda afectada de modo significativo la regularidad de las operaciones de aeronaves.”*

### 6.3.2.3 Zonas críticas/sensibles ILS

Las zonas críticas y sensibles de ILS se definen como sigue:

- **Zona Crítica:** Área de dimensiones definidas correspondiente a Localizador o Senda de Planeo de una instalación ILS, dentro de la cual, la presencia de vehículos, aeronaves u otros obstáculos pueden generar una perturbación fuera de los límites tolerables de la señal ILS en el espacio desde el límite de cobertura hasta una distancia de 3,7 kilómetros de la cabecera de pista.
- **Zona sensible:** Área de dimensiones definidas correspondiente a Localizador o Senda de Planeo de una instalación ILS, dentro de la cual, la presencia de vehículos, aeronaves u otros obstáculos pueden generar una perturbación fuera de los límites tolerables de la señal ILS en el espacio desde una distancia de 3,7 kilómetros de la cabecera de pista hasta el punto en el que la señal deja de ser requerida para el procedimiento de aproximación.

En el área que se pretende que ocupe la instalación, únicamente existe la posibilidad de vulnerar las zonas críticas o sensibles del ILS (Localizador y Senda de Planeo) de la cabecera 03L. La zona crítica y sensible del LOC y GP, así como el área vallada del LOC se representan en la siguiente imagen.

Como se aprecia, esta restricción es la menos restrictiva a efectos de área disponible para la operación, ya que más allá del array de antenas del Localizador, no existe ninguna restricción en cuanto a zona crítica o sensible del ILS.

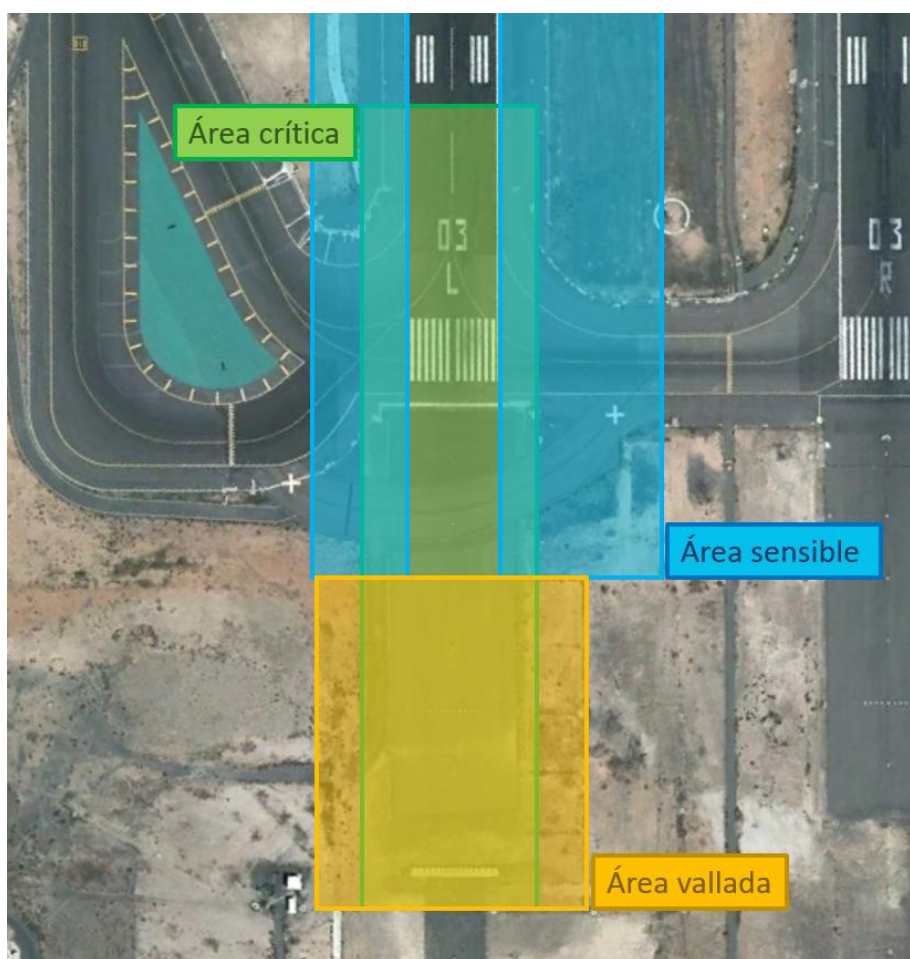


Figura 6-19. Representación aproximada de zonas críticas/sensibles y área vallada de ILS en la cabecera 03L.

### 6.3.3 Emplazamiento de los equipos

Analizada en profundidad la zona en la que se van a emplazar los elementos del GBAS, se expone a continuación el criterio seguido para determinar la ubicación final de cada uno de los elementos: las antenas RRA, la antena VDB y la caseta o “Shelter”. Habiendo ya sido analizados en profundidad, en apartados anteriores, cada uno de los elementos del sistema, este apartado se centrará en el emplazamiento de los mismos.

#### 6.3.3.1 Antenas RRA

El primer elemento, y en particular, el más determinante a la hora de la instalación son las antenas receptoras de la señal GNSS, comúnmente conocidas como RRA o “Reference Receiver Antenna”.

A la hora de emplazar las antenas, de todos los criterios que se deben cumplir, y que fueron enunciados en el Apartado 5.2, el más determinante de ellos es la LOCA o “Local Object Consideration Area”, la cual equivale a la servidumbre de la antena. A modo de recordatorio se muestra la siguiente imagen representativa de la LOCA.

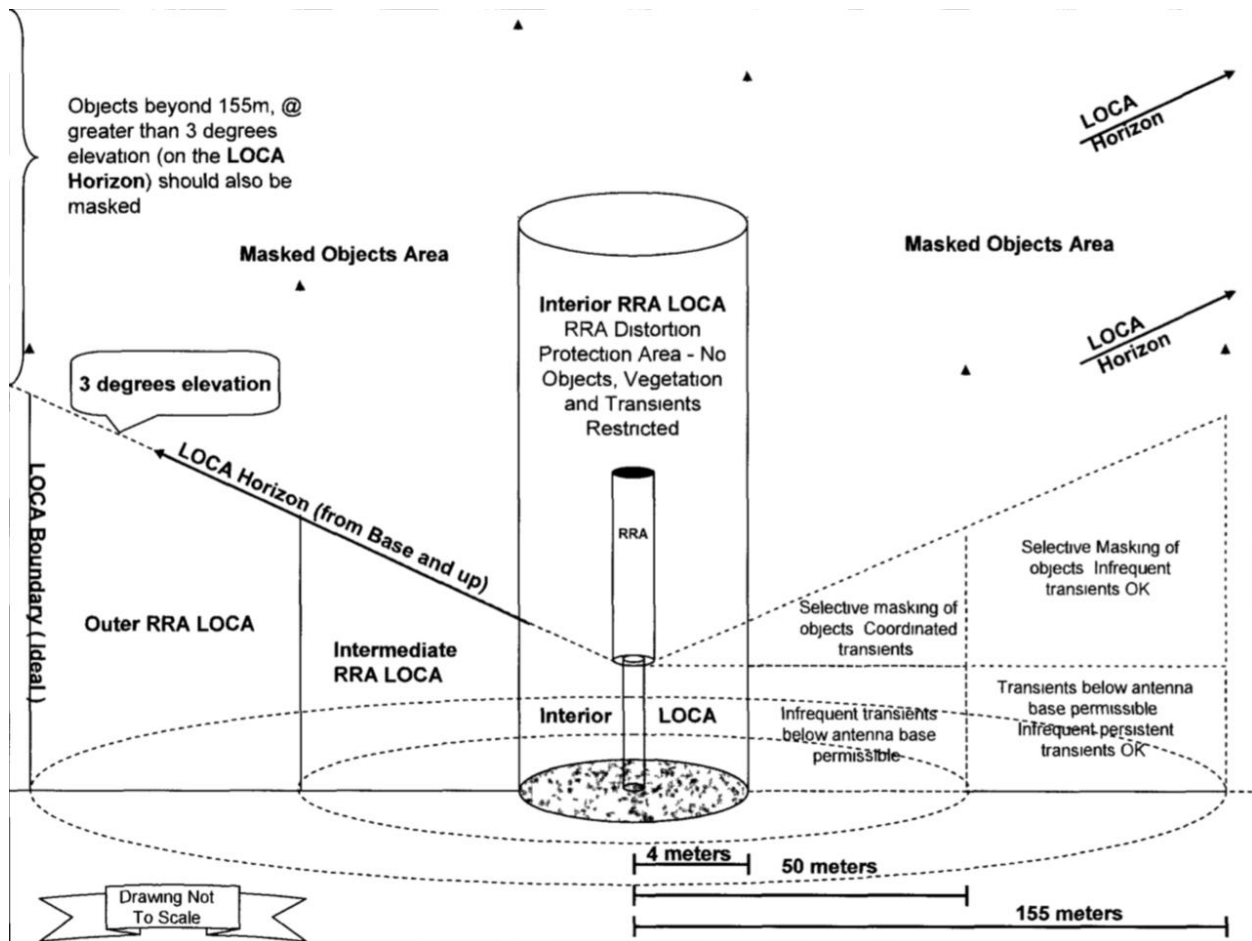


Figura 6-20. GBAS LOCA

En la que se muestran las tres zonas:

- **LOCA interna:** Restringido cualquier tipo de objeto, incluso vegetación, ya sea temporal o permanente dentro de la misma.
- **LOCA intermedia:** Restringidos obstáculos permanentes y permitidos obstáculos temporales por debajo de la base de la antena.
- **LOCA externa:** Permitidos obstáculos temporales o fijos por debajo de la altura base de la antena.
- **LOCA Horizon o máscara de elevación de horizonte:** No se permiten obstáculos por encima de la máscara dentro de la circunferencia centrada en el punto de referencia de la antena y de 155 metros de radio.

Como se analizó posteriormente, el número de antenas RRA que se instalan en los aeropuertos con GBAS es cuatro. Cada una de ellas debe, además de respetar las LOCA, los siguientes requisitos.



Factor limitante	Requisito
Distancia máxima entre GRP y LTP (Cobertura)	5km desde el GRP hasta LRP
Reflexiones correladas	Distancia mínima entre pares de RRA de 105 metros.
Monitoreo de efectos ionosféricos	Distancia máxima entre pares de RRA de 200 metros
Ataques intencionados (jamming)	RRA separadas de parkings, autovías, etc.

Tabla 6–2. Requisitos de instalación para antenas RRA

Con todo ello, las dos posibles configuraciones de instalación de las RRA que se han analizado son las siguientes.

Configuración 1

Tras analizar la disposición de las antenas en diversos aeropuertos, se opta por una configuración en forma de cuadrado, la cual es la disposición óptima a nivel funcional. Así mismo, se ha buscado mantener, en la medida de lo posible, los límites de las LOCAs dentro del recinto aeroportuario.

Cumpliendo con los requisitos de la Tabla 6–2. Requisitos de instalación para antenas RRA, el resultado es el siguiente.



Figura 6-21. Posición antenas RRA.  
Configuración 1

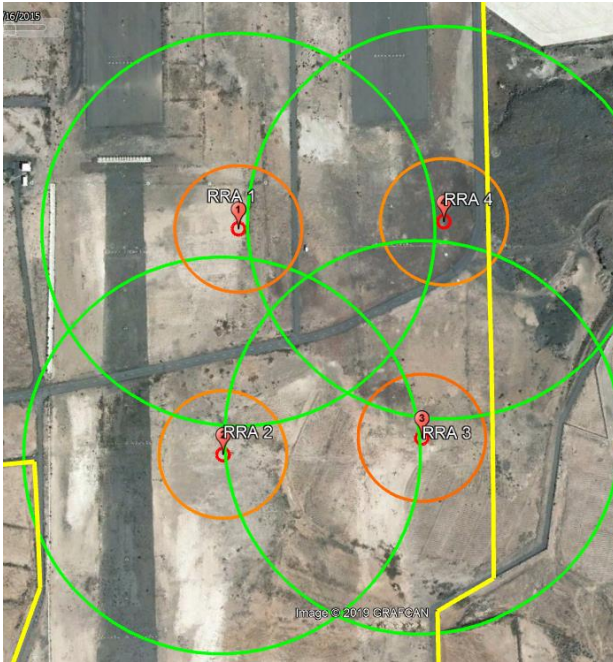


Figura 6-22. LOCAs antenas RRA.  
Configuración 1

Se muestra en distintos colores la proyección horizontal de las LOCA de cada antena, siendo en rojo la LOCA interna, en naranja la LOCA intermedia y en verde la LOCA externa.

Como se observa, dicha disposición permite mantener las regiones de las LOCA internas e intermedias dentro del recinto aeroportuario prácticamente en su totalidad, poseyendo así un total control sobre las posibles intrusiones que se puedan dar en las mismas.

Este hecho, junto con el de ser una disposición óptima de manera que formen un cuadrado, hace parecer que esta sea la configuración más recomendable.

Al comprobar que se respetan las restricciones aeroportuarias, se observa fácilmente como cuatro antenas quedan fuera de la RESA, de la zona crítica y sensible del ILS (al estar por detrás de este) y de las servidumbres del aeropuerto, ya que las antenas apenas superan el metro de altura sobre el terreno.

No obstante, es necesario comprobar que la orografía del terreno circundante a las antenas respeta las servidumbres (LOCAs) de las mismas, sin penetrar en la máscara de elevación de esta. Al ser la pendiente de esta máscara de 3°, el terreno que rodee a las antenas debe ser relativamente plano para evitar que esto suceda.

Las coordenadas de las antenas y su elevación es la siguiente.

Antena	Coordenadas		Elevación del terreno
RRA 1	27° 54' 58.23" N	15° 23' 33.20" O	24 m
RRA 2	27° 54' 53.04" N	15° 23' 36.05" O	26 m
RRA 3	27° 54' 51.54" N	15° 23' 30.57" O	27 m
RRA 4	27° 54' 56.44" N	15° 23' 27.63" O	23 m

Tabla 6–3. Coordenadas y elevación antenas RRA. Configuración 1

Al comprobar la elevación del terreno en dicha zona se observa lo siguiente.

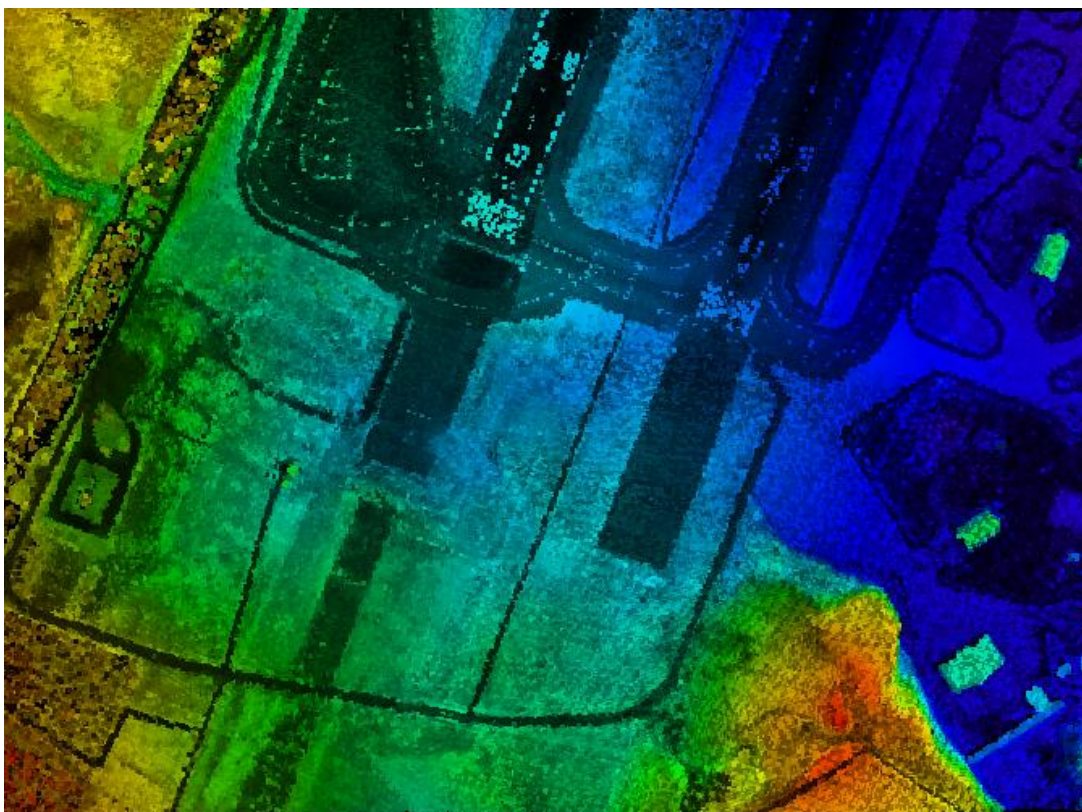


Figura 6-23. Elevación del terreno medida mediante LIDAR en área de interés. Fuente: Grafcan

Se aprecia como existe una zona, próxima a la posición de las antenas y en concreto la RRA 4, en la que existe una pequeña colina que se eleva sobre la altitud de la zona aeroportuaria.

De hecho, el pico de dicha colina posee una elevación de 41 metros, mientras que la altitud de la antena RRA 4 es de 23m, siendo la menor de las cuatro debido a la zona en la que se encuentra, más próxima a la cabecera 03R.

La vista de la representación 3D desde una perspectiva adecuada permite apreciar con mayor claridad la problemática.

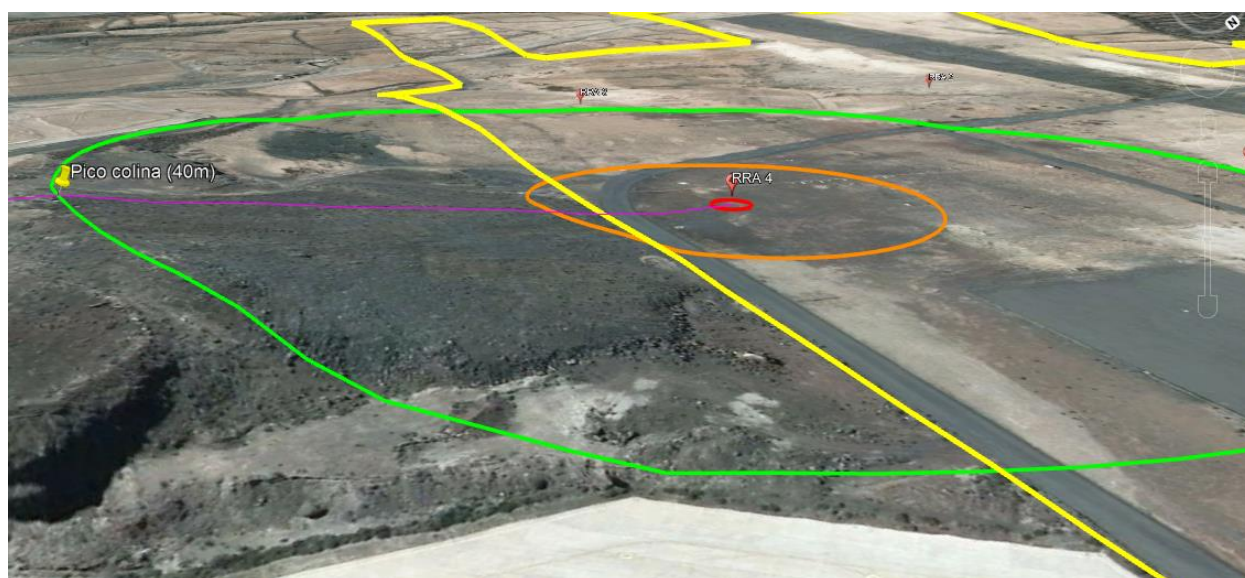


Figura 6-24. Detalle 3D de la vulneración de la LOCA RRA 4 (Configuración 1) por el terreno. Fuente: Google Earth Pro



El perfil de elevación trazado desde la base de la antena hasta el pico de la colina (en la imagen anterior en magenta) es el siguiente.

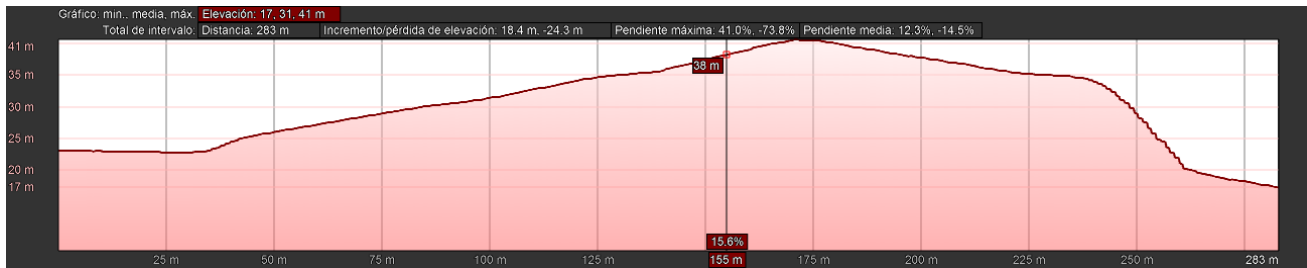


Figura 6-25. Perfil de elevación del terreno alrededor de RRA 4 (Configuración 1). Fuente: Google Earth Pro

Analizando el perfil se determina que el pico de máxima altitud ( $h_{\text{terreno}} = 38 \text{ m}$ ) a la distancia de 155 metros medida en línea recta desde la base de la RRA 4. Dicha distancia de 155m se corresponde con el radio de la circunferencia del límite superior de la LOCA externa.

Si se calcula la altitud “h” de la máscara de elevación en ese punto:

$$h_{LOCA} = 23 + 155 \tan(3^\circ) = 31,1 \text{ m} \quad (6-1)$$

La colina, en el punto de mayor altitud penetra dentro de la máscara de elevación de la LOCA correspondiente a la RRA 4 una altura de:

$$h_{\text{terreno}} - h_{LOCA} = 38 - 31.1 = 6,9 \text{ m} \quad (6-2)$$

Se trata de una vulneración de un valor considerablemente alto, casi 7 metros, la cual puede afectar a la precisión de la señal GNSS que recibe dicha antena.

Se concluye que, razonablemente, se trata de una vulneración de la LOCA inaceptable, lo que obliga a descartar dicha configuración de emplazamiento de antena y buscar una alternativa.

La alternativa se propone a continuación en la configuración 2, y pasa por mantener la posición del resto de antenas, desplazando únicamente la RRA 4, ya que es la única que se ve afectada por lo anteriormente explicado. No obstante, se deberá de seguir asegurando que se cumplen los requisitos de emplazamiento listados en la Tabla 6-2.

## Configuración 2

La configuración 2 nace de la necesidad de desplazar la RRA 4 hasta una posición en la que el terreno no vulnere la máscara de elevación de horizonte de la antena.

Para ello, y con el objetivo de mantener una disposición geométrica de las antenas lo más regular posible, se ha optado por mantener las otras 3 antenas (RRA 1, 2 y 3) en el mismo lugar que ocupaban en la disposición en cuadrado de la configuración 1. Así mismo, la RRA 4 se ha desplazado hacia la zona al límite sur del aeropuerto, quedando una disposición final de las cuatro antenas en forma de “T”.



Figura 6-26. Posición antenas RRA.  
Configuración 2

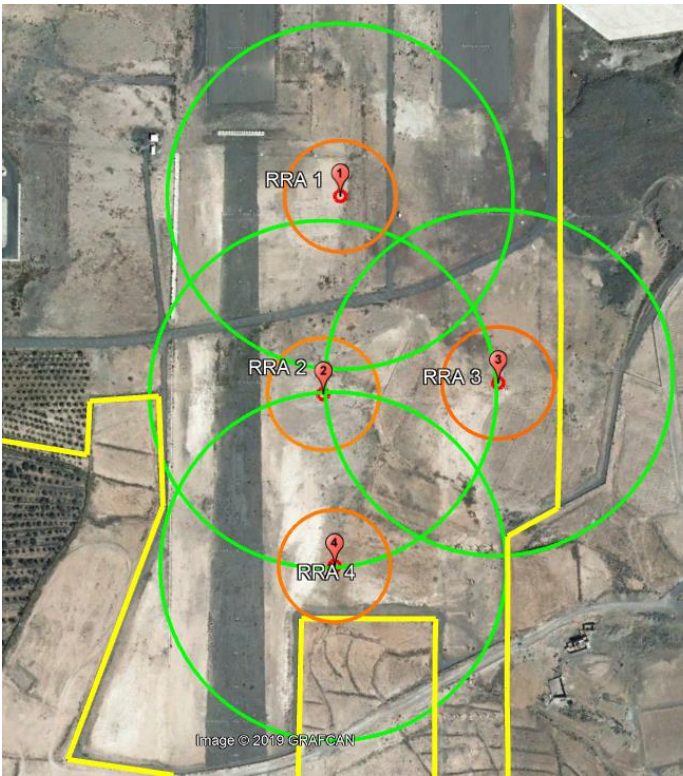


Figura 6-27. Posición antenas RRA.  
Configuración 2

Las coordenadas y elevación de las antenas son las siguientes:

Antena		Coordenadas		Elevación del terreno
RRA 1	27° 54' 58.23" N	15° 23' 33.20" O	24 m	
RRA 2	27° 54' 53.04" N	15° 23' 36.05" O	26 m	
RRA 3	27° 54' 51.54" N	15° 23' 30.57" O	27 m	
RRA 4	27° 54' 48.28" N	15° 23' 37.71" O	28 m	

Tabla 6-4. Coordenadas y elevación antenas RRA. Configuración 2

Se aprecia como, debido a la nueva posición de la RRA 4, la elevación de la misma ha aumentado hasta alcanzar los 28 metros con respecto al nivel del mar. Esto se debe a la orografía propia del terreno. Como se puede observar en la imagen LIDAR, la región en la que se emplaza ahora la antena está ligeramente más elevada. Esto resulta algo positivo, de cara a evitar de nuevo vulneraciones del propio terreno dentro de la LOCA.

Repitiendo de nuevo el mismo procedimiento que anteriormente, se analiza el extremo de la LOCA externa de la RRA 4 (circunferencia verde) localizando el punto más desfavorable, es decir, el punto en el que la elevación del terreno es mayor.



Figura 6-28. Detalle 3D de la LOCA RRA 4 (Configuración 2). Fuente: Google Earth Pro

En esta ocasión, el punto de mayor elevación del terreno es de  $h_{\text{terreno}} = 35 \text{ m}$ , siendo la elevación de la máscara de elevación de la LOCA en ese punto de:

$$h_{\text{LOCA}} = 28 + 155 \cdot \tan(3^\circ) = 36,1 \text{ m} \quad (6-3)$$

De tal modo que el punto más alto del terreno se sitúa 1 metro por debajo de la LOCA

$$h_{\text{terreno}} - h_{\text{LOCA}} = 35 - 36,1 = -1,1 \text{ m} \quad (6-4)$$

De esta forma, se comprueba que la configuración 2 se corresponde con una configuración válida en el aspecto de la vulneración de la LOCA de la RRA 4.

Del mismo modo, se han analizado las LOCAs de las 3 antenas restantes para comprobar que no existe vulneración alguna de este tipo. En la siguiente tabla se muestra, en el punto más desfavorable, la elevación de la máscara de elevación LOCA ( $h_{\text{LOCA}}$ ) y la elevación del terreno ( $h_{\text{terreno}}$ ) para cada una de las 3 antenas restantes.

Antena	Elevación base de antena	$h_{\text{LOCA}}$	$h_{\text{terreno}}$
RRA 1	28 m	32,12 m	28 m
RRA 2	33 m	34,12 m	33 m
RRA 3	35 m	35,12 m	35 m
RRA4	36 m	36,12 m	35 m

Tabla 6-5. Elevaciones de antenas, LOCAs y terreno. Configuración 2

Se concluye que las elevaciones de las LOCA son superiores a la máxima elevación del terreno para cada antena.

En resumen, la configuración elegida para la instalación de las antenas será la Configuración 2. En la siguiente imagen se adjunta una imagen en la que se muestra la posición definitiva de las antenas, sus LOCAs, las RESAs de ambas cabeceras y la zona vallada del LOC ILS, comprobando como se respetan ambas últimas.



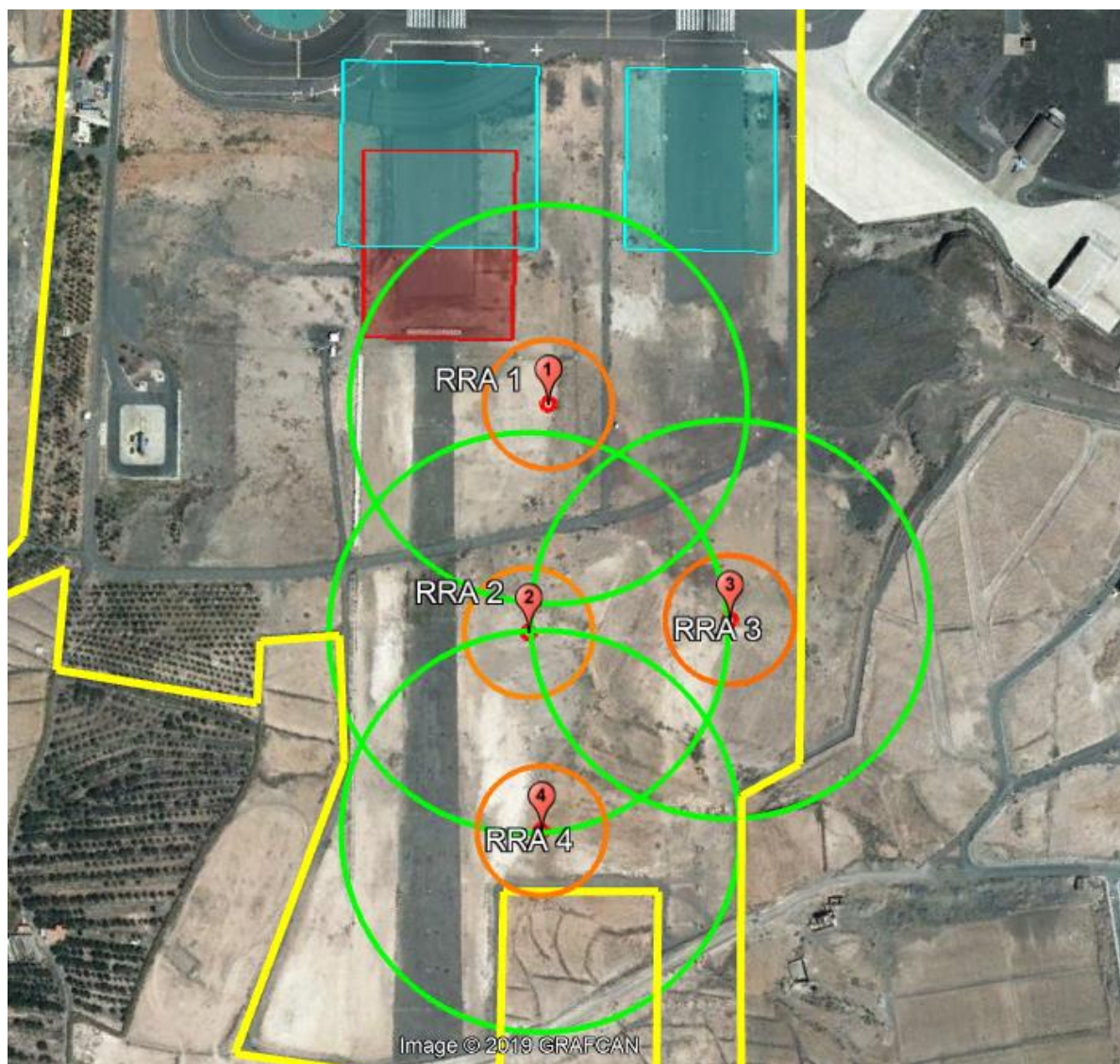


Figura 6-29. Configuración final adoptada para antenas RRA. (Configuración 2)

#### 6.3.3.2 Antena VDB y Shelter

Una vez determinada la posición de las RRA, es necesario instalar la antena emisora VDB y la caseta donde se introducirán todos los sistemas electrónicos de los equipos del GBAS.

Dado la amplia extensión de terreno que ocupan las RRA junto a sus respectivas servidumbres, las posibilidades de emplazamiento de la VDB y la shelter se ven reducidas. No obstante, la posición de las RRA que se determinó en el apartado anterior se realizó a propósito, reservando el espacio idóneo para ubicar estos dos últimos elementos.

Representando de nuevo la distribución de las RRA, junto con la RESA y la zona restringida por el ILS, se observa como existe una porción de terreno disponible, en la que se podrán instalar tanto la antena VDB como la caseta.

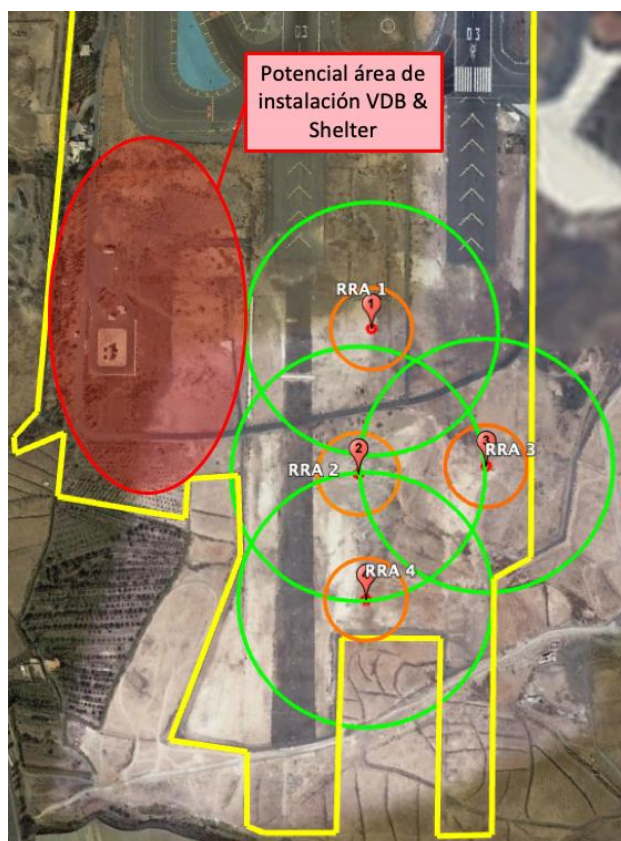


Figura 6-30. Configuración final adoptada para antenas RRA. (Configuración 2)

No obstante, se trata de una zona delicada, en la que el propio terreno vulnera en cierta extensión la servidumbre aeronáutica de aproximación de la cabecera 03L y la servidumbre radioeléctrica del Localizador del ILS.

En las siguientes imágenes se representa con mayor detalle este hecho. A la izquierda, se ilustra sombreada en rojo la zona aproximada en la que las SSAA se ven vulneradas por el terreno. A la derecha, se puede observar, a través de una imagen obtenida mediante LIDAR, como es la orografía del terreno.

La elevación del terreno es máxima junto al límite de la valla aeroportuaria, mientras que la pendiente es decreciente conforme nos acercamos al área de movimiento.

En consecuencia, se busca ubicar tanto la antena VDB como la caseta en un punto en el que la elevación del terreno sea lo menor posible, para tener cierto margen entre el suelo y la altura de la servidumbre. Esto es, lo más cerca posible del área de movimiento.

Así mismo, viendo que las posibilidades de emplazamiento se limitan, se ubicará tanto la shelter como la antena VDB en el mismo punto, lo cual, como se observó en el análisis de otros aeropuertos, es algo bastante recurrente.





Figura 6-31. Zona vulneración de servidumbres por terreno

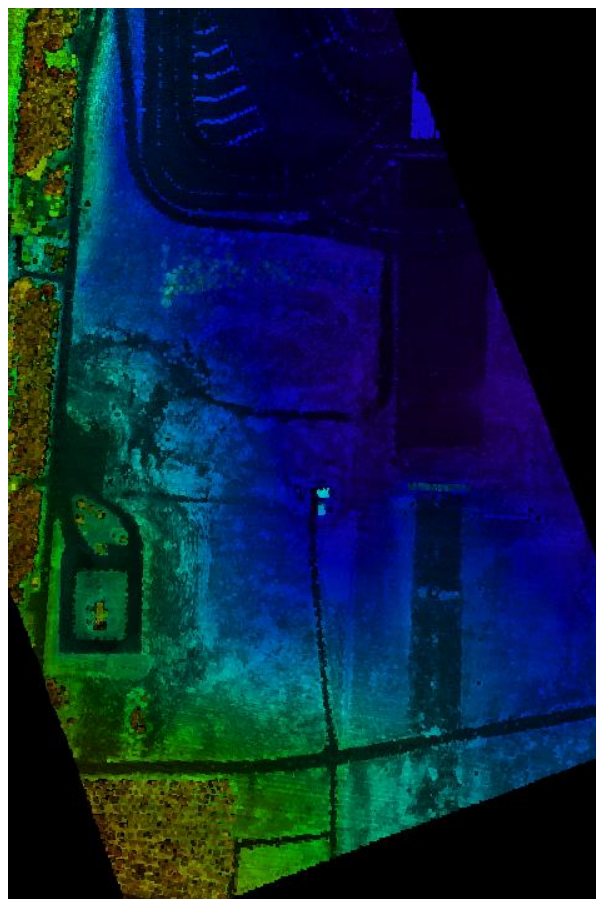


Figura 6-32. Topografía LIDAR de la zona afectada

La estructura de la antena VDB sobre la cual se sitúa esta suele tener aproximadamente 8 metros de altura, como se ha podido comprobar en el aeropuerto de Málaga. Así mismo, la altura de la caseta suele ser de unos 3 metros aproximadamente.

En la imagen más abajo, se observa como en la zona próxima al vial discurren dos líneas blanca y roja. Representan la servidumbre del Localizador y de Aproximación de cabecera 03L. Ambas discurren a una elevación de 35 metros.

De este modo, es necesario ubicar la antena VDB junto a la caseta en un punto en el que la elevación del terreno sea como máximo de 27 metros, de manera que los 8 metros de la antena no superen los 35 metros de elevación de la servidumbre.

La ubicación elegida, por tanto, será la siguiente.

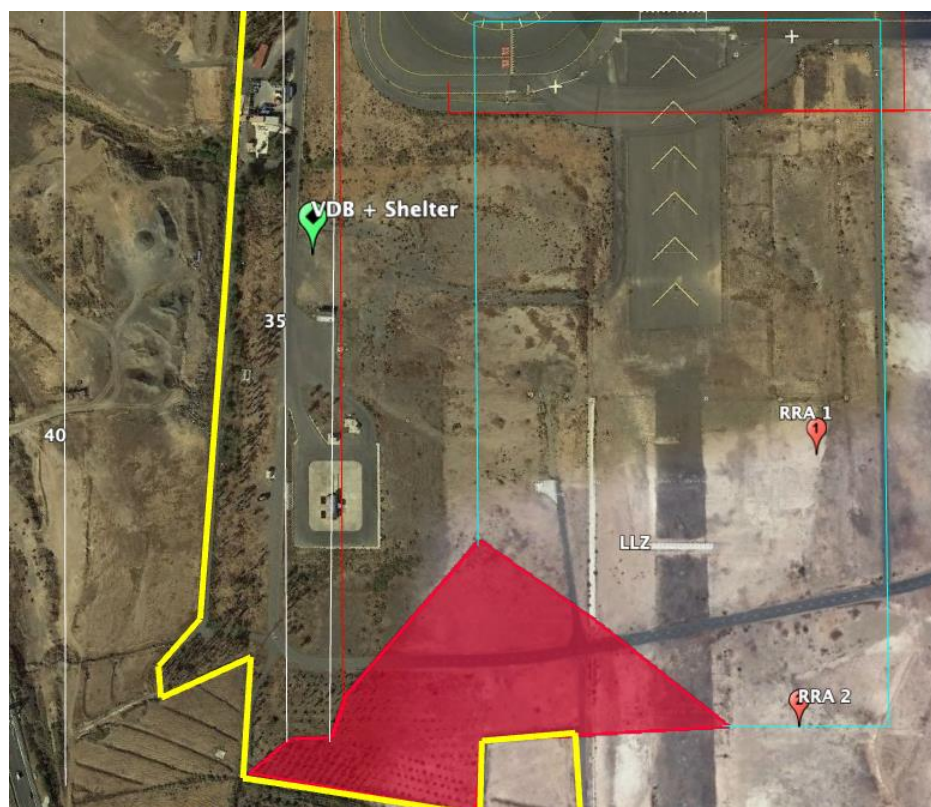


Figura 6-33. Ubicación elegida para la antena VDB y Shelter

Donde las coordenadas y la elevación son las siguientes.

Elemento	Coordenadas		Elevación del terreno
Antena VDB	27° 55' 6.13" N	15° 23' 42.70 " O	26 m
Shelter	27° 55' 6.13" N	15° 23' 42.70 " O	26 m

Tabla 6–6. Coordenadas y elevación antena VDB y Shelter. Configuración 2

La elevación del terreno en dicho punto es de 26 metros, por lo que, junto a los 8 metros de altura de la antena, suman una elevación total de 34 metros. Es decir, un metro por debajo de la superficie de aproximación y de la servidumbre del localizador.

Así mismo, se encuentra en una posición idónea ya que está próxima al vial perimetral del aeropuerto, haciendo el acceso tanto al shelter como a la antena mucho más sencillo.

En cuanto a la propia servidumbre radioeléctrica de la antena, no se define específicamente una superficie para la misma. En la normativa se indica que esta superficie será establecida por el fabricante. No obstante, al no disponer de datos, se ha tomado como referencia la servidumbre radioeléctrica incluida en el Real Decreto [16] para instalaciones radioeléctricas VHF o UHF.

Las características de la servidumbre para emisores VHF son las siguientes.



Instalación	Zona de seguridad	Zona de limitación de alturas	Superficie de limitación de alturas
Frecuencias muy altas (VHF) o ultra elevada (UHF)	300 m	2000 m	5 %

Tabla 6–7. Servidumbre radioeléctrica para emisores VHF/UHF según Real Decreto [16]

El resultado es el siguiente.

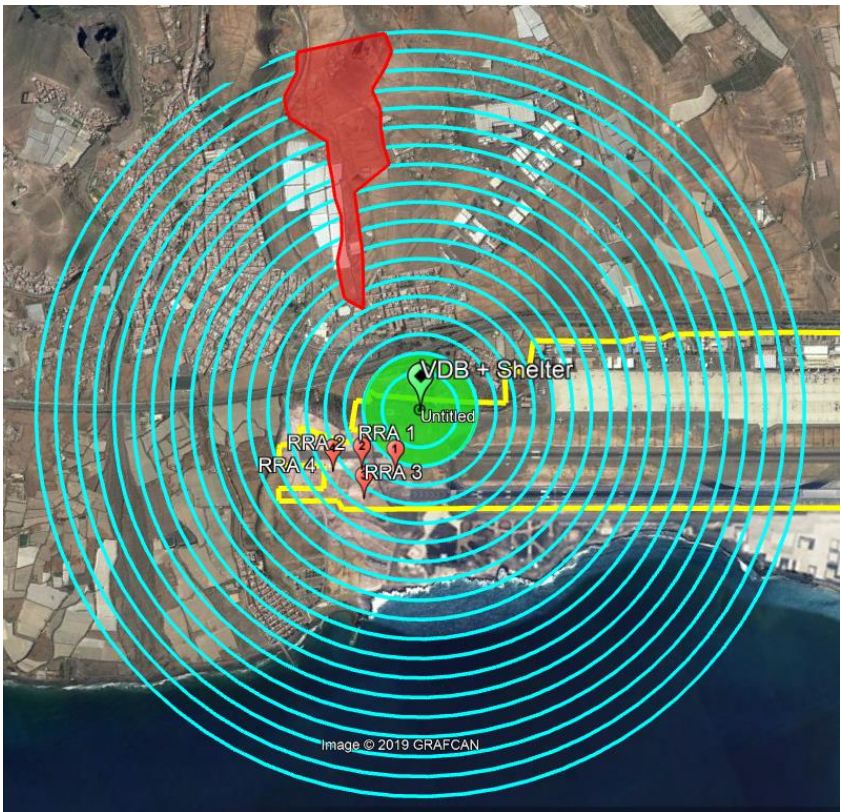


Figura 6-34. Servidumbre radioeléctrica. Antena VDB GBAS.

Se observa cómo se respeta casi la totalidad de la zona de limitación de alturas. Existe una pequeña región sombreada en rojo donde el terreno posee mayor elevación que la propia superficie. Se trata de una vulneración tolerable y prácticamente inevitable debido a la orografía de la isla. De hecho, se trata de un hecho que ocurre con el resto de servidumbres radioeléctricas del aeropuerto como el VOR o DME. No obstante, es necesaria comprobación por parte de ENAIRE para asegurar que la integridad de la señal no se ve afectada.

En la siguiente imagen se muestra con mayor detalle la afección.

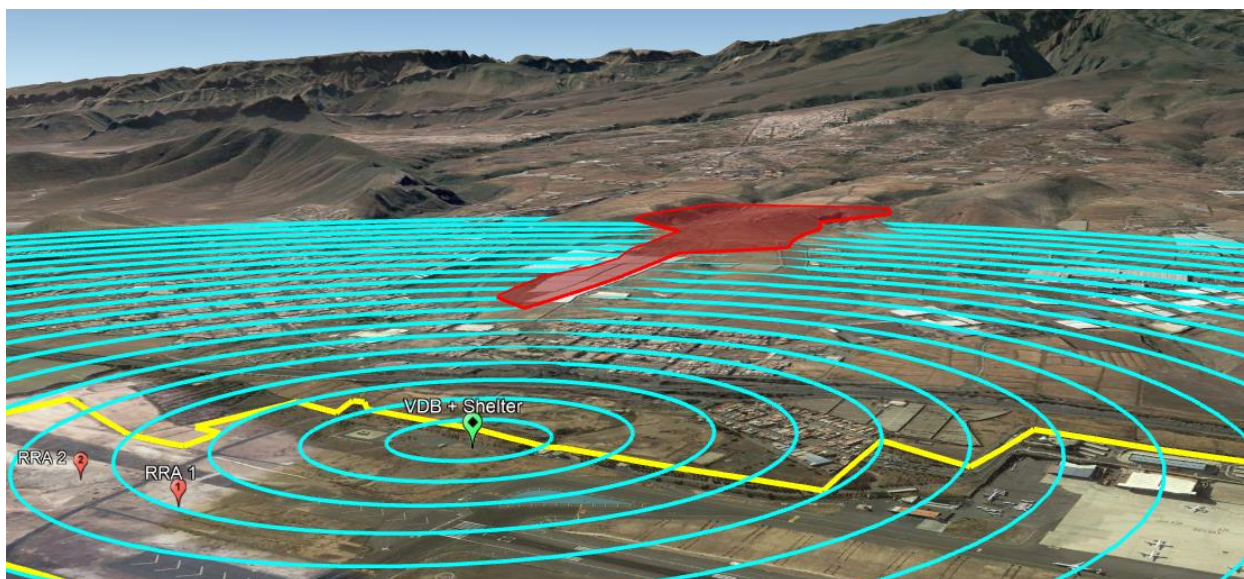


Figura 6-35. Servidumbre radioeléctrica. Antena VDB GBAS. Detalle de vulneración.

### 6.3.3.3 Resumen del emplazamiento del GBAS

Tras el extenso análisis realizado, a modo de resumen, se representa a continuación la configuración final por la que se opta para la instalación de los elementos del subsistema terrestre del GBAS. Entre los que se encuentran las cuatro antenas RRA, la antena VDB y el shelter.



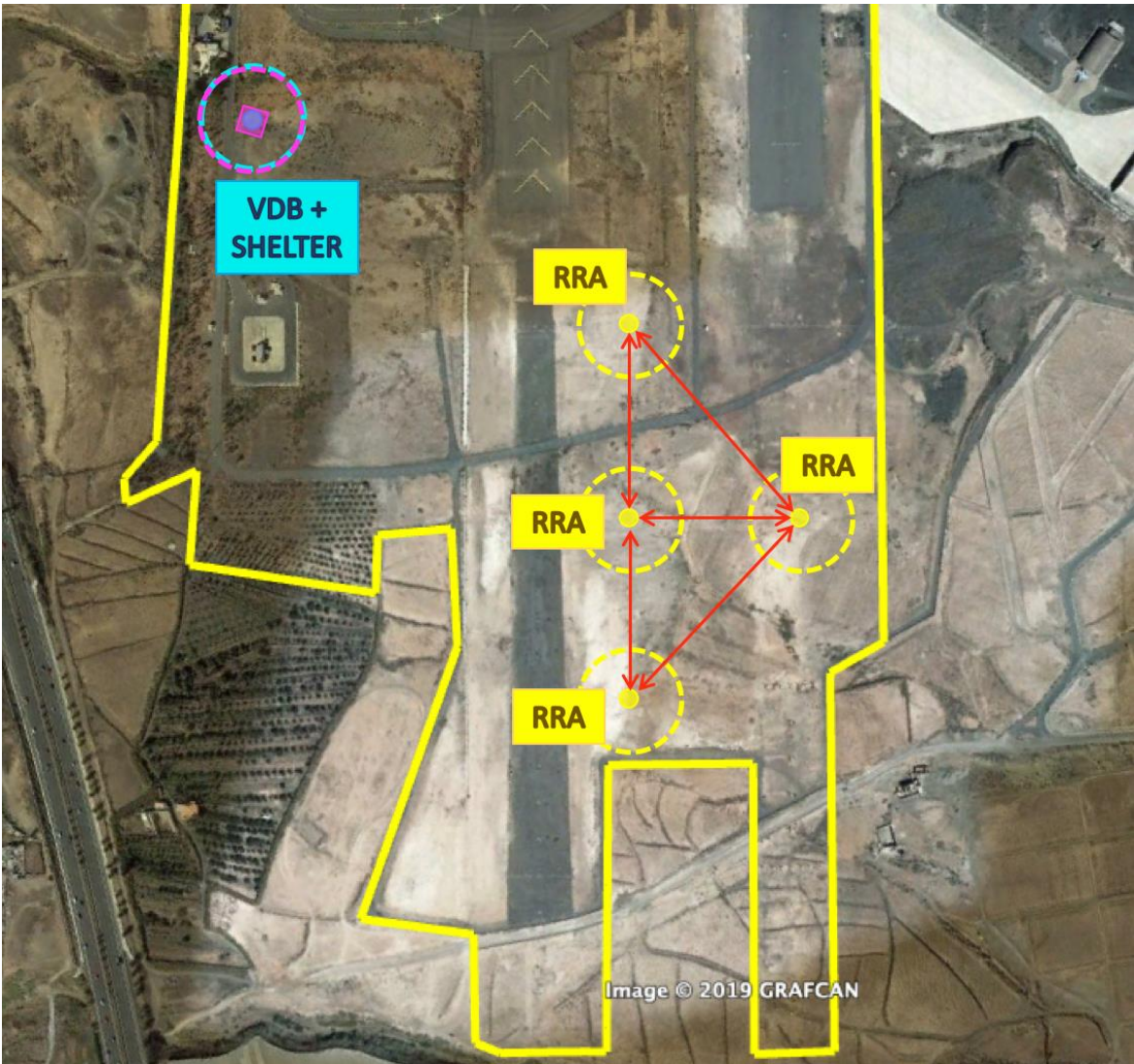


Figura 6-36. Emplazamiento definitivo de los elementos del subsistema terrestre GBAS

Así mismo, se adjunta una tabla resumen de las coordenadas del punto en el que se sitúa cada elemento, junto a la elevación del terreno en dicho punto.

Elemento		Coordenadas		Elevación del terreno
RRA 1	27° 54' 58.23" N	15° 23' 33.20" O	24 m	
RRA 2	27° 54' 53.04" N	15° 23' 36.05" O	26 m	
RRA 3	27° 54' 51.54" N	15° 23' 30.57" O	27 m	
RRA 4	27° 54' 48.28" N	15° 23' 37.71" O	28 m	
Antena VDB	27° 55' 6.13" N	15° 23' 42.70 " O	26 m	
Shelter	27° 55' 6.13" N	15° 23' 42.70 " O	26 m	

Tabla 6–8. Coordenadas y elevación del terreno en la ubicación de los elementos del GBAS

## 7 ALIMENTACIÓN E INTERCONEXIÓN DE EQUIPOS

---

Determinada ya la posición de cada uno de los elementos que compondrán en subsistema terrestre del GBAS en el aeropuerto, se pretende determinar a nivel esquemático la distribución que se seguirá a la hora de realizar la conexión de los equipos y la alimentación eléctrica de los mismos.

El criterio a seguir a la hora de interconectar los sistemas será el mismo que se siguió en 2012 para la instalación del GBAS en el Aeropuerto de Málaga. De este modo, se seguirán las mismas pautas que se siguieron en Málaga, adaptando dicho caso a la particularidad del Aeropuerto de Gran Canaria. La estructura de este apartado será la siguiente:

En primer lugar, se determinará el esquema de alimentación eléctrica de los sistemas. Partiendo de la red eléctrica existente en el aeropuerto, será necesario establecer una nueva línea eléctrica subterránea hasta cada uno de los equipos.

Posteriormente, se determinará cual será el trazado que seguirán las conexiones entre equipos del GBAS y el centro de control del mismo, el cual como se verá, será la torre de control del aeropuerto.

### 7.1 Alimentación eléctrica de los equipos del GBAS

La alimentación de los diferentes sistemas que se encuentran dentro del campo de vuelos del aeropuerto, sin considerar las luces aeronáuticas de superficie y la señalización aeronáutica de superficie que se alimentan mediante circuitos propios, el resto de elementos se encuentran alimentados a partir de anillos de alta/media tensión que tienen como origen y retorno la central eléctrica del aeropuerto.

Estos anillos se conectan a centros de transformación, en los cuales se pasa de alta a baja tensión para alimentar a los equipos según estos requieran.

Si se analiza la distribución de anillos del Aeropuerto de Gran Canaria, se comprueba como el anillo que alimenta a los sistemas que se encuentran próximos a la zona donde se instalará el GBAS es el Anillo 1. Este anillo alimenta eléctricamente, entre otros elementos, al hangar del SEI o al ILS 21R.

En la siguiente imagen se muestra esquemáticamente el recorrido del anillo 1.

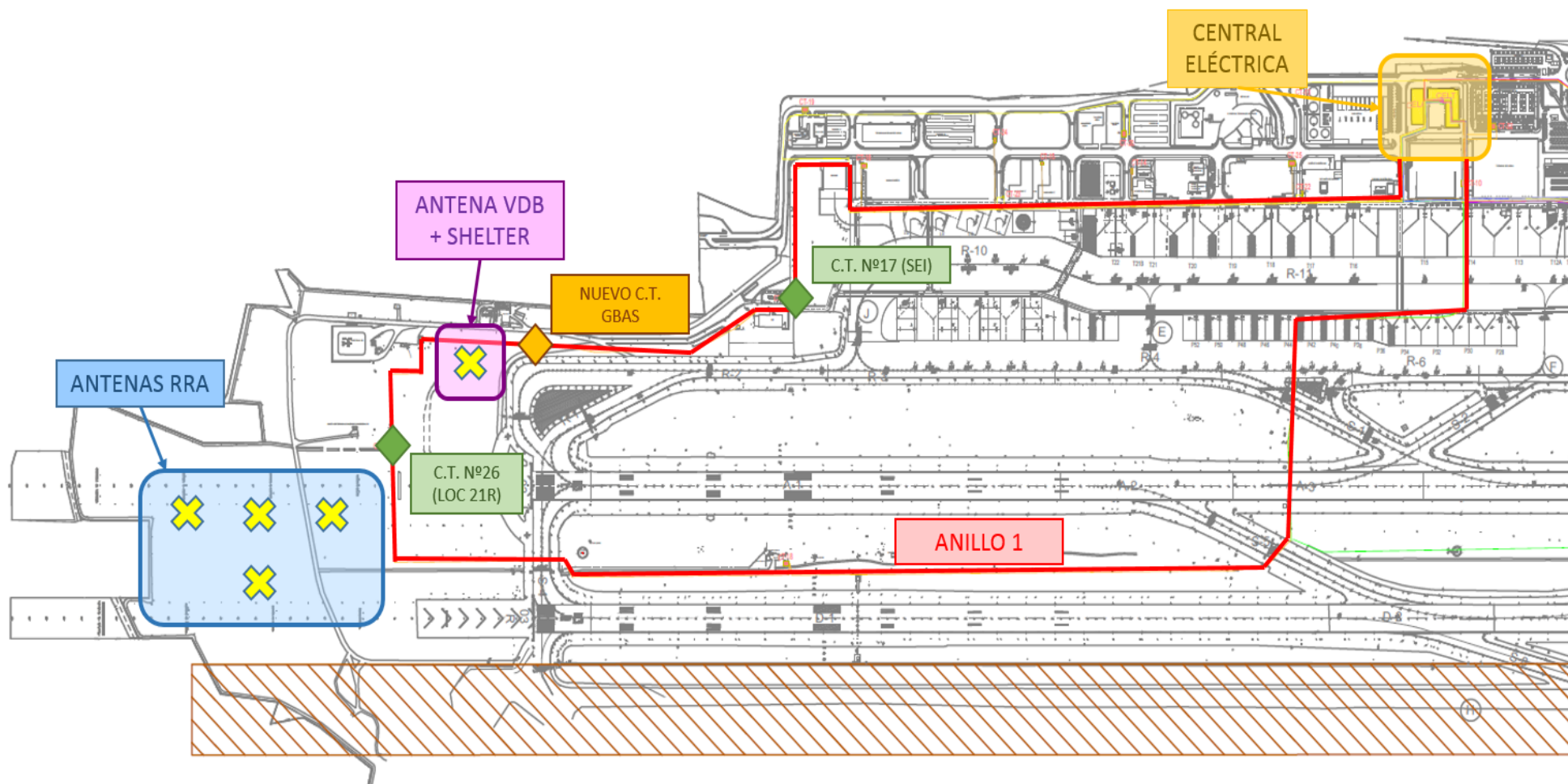


Figura 7-1. Anillo 1 y Centros de Transformación asociados del Aeropuerto de Gran Canaria. Conexión Con elementos del GBAS

Como se indicaba, el anillo que alimenta a la zona de interés en la que están ubicados los sistemas del GBAS es el Anillo 1. Dicho anillo parte de la central eléctrica y transcurre por la plataforma hasta alcanzar la cabecera 03L para volver a la central rodeando parte de la pista.

A cada uno de los anillos en general, y en el anillo 1 en particular, se encuentran conectados una serie de Centros de Transformación entre los que se encuentran, entre otros, el del hangar del SEI o el del ILS 21R.

Dichos centros de transformación son puntos del circuito en los que existe una ramificación del circuito conectada a una serie de transformadores. Los transformadores se encargan de reducir la tensión de la línea de los 200kV que posee el anillo a la tensión necesaria para alimentar a los equipos conectados a dicha ramificación del circuito.

En concreto, próxima a la zona de las antenas RRA se encuentra el Centro de Transformación N°26, el cual alimenta a la caseta del Localizador 21R y al centro de meteorología cercano.

En la siguiente imagen se muestra parte del esquema unifilar del aeropuerto, donde se representan las conexiones del Anillo 1.

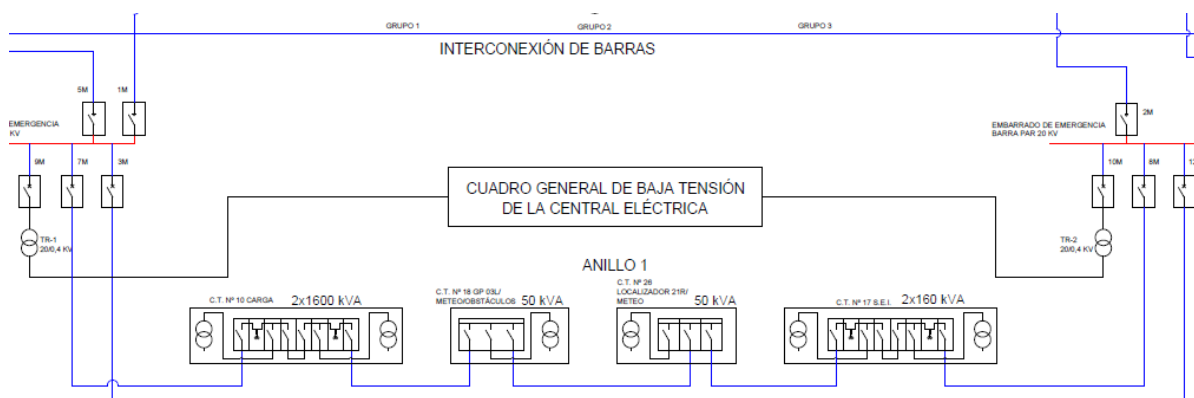


Figura 7-2. Esquema unifilar del Anillo 1

Como se aprecia en la siguiente imagen la propuesta es introducir un nuevo Centro de Transformación (Nuevo C.T. GBAS) entre los actuales C.T. N° 17 correspondiente al SEI y el C.T. N°26 correspondiente al Localizador 21R.

El esquema unifilar quedaría del siguiente modo:

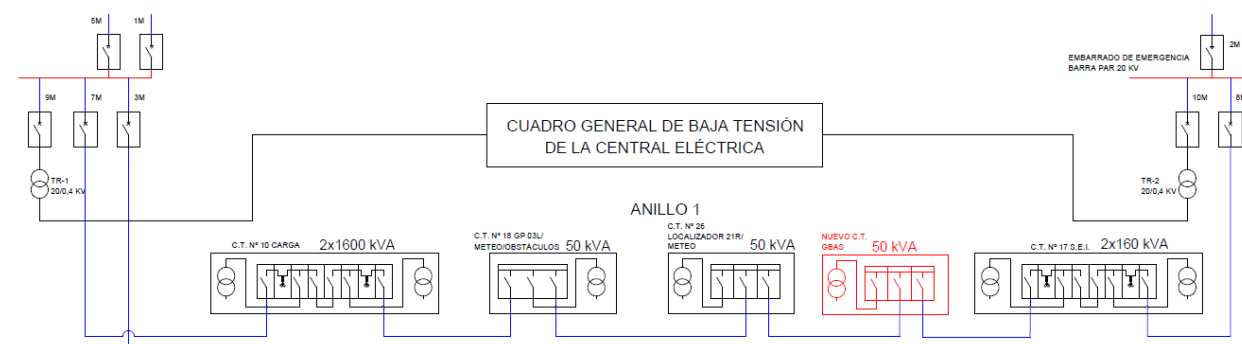


Figura 7-3. Esquema unifilar del Anillo 1 tras instalación del C.T. GBAS

En rojo se muestra el nuevo C.T. a introducir en la línea del anillo 1.

Dicho centro de transformación alimentará tanto a los sistemas incluidos dentro de la caseta como a la antena VDB que se emplaza junto a la caseta. No obstante, es necesario también alimentar al resto de las cuatro antenas RRA.



Para ello se propone trazar un anillo secundario, que partiendo del centro de transformación se distribuya alrededor de la posición de las antenas RRA alimentando a cada una de ellas. Dado que este anillo se conecta al lado de baja tensión del C.T. del GBAS, la tensión del mismo es la adecuada para alimentar a las antenas RRA.

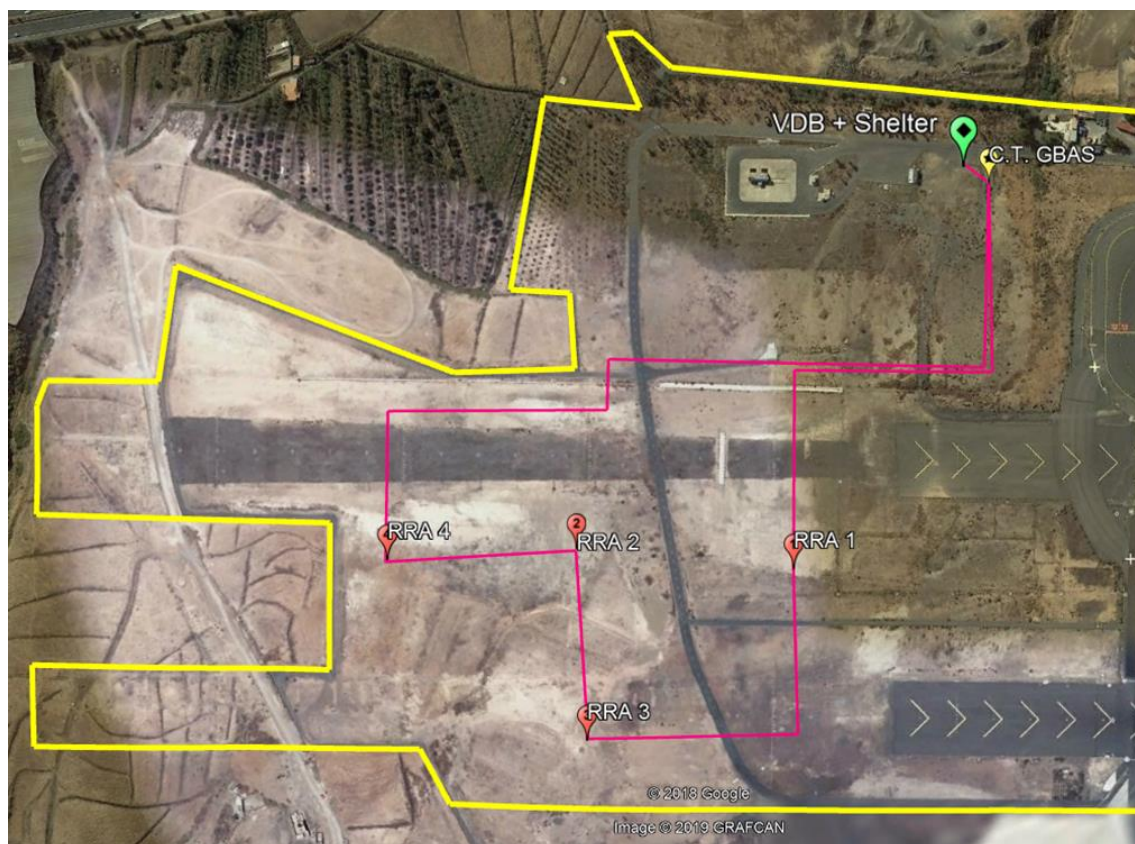


Figura 7-4. Anillo secundario de alimentación eléctrica para RRAs

Las principales ventajas de esta distribución son las siguientes.

En primer lugar, se evita tener que instalar otro centro de transformación que alimente a las antenas RRA, siendo esta una solución de un menor coste. Así mismo, se consigue que el completo de los equipos del GBAS estén alimentados a través de una misma ramificación del Anillo 1.

Habría sido posible alimentar las antenas RRA desde el Centro de Transformación N°26 del Localizador 21R, aunque esto habría supuesto que ambos sistemas de ayuda a la aproximación (ILS 21R y GBAS) dependieran de un mismo circuito, lo cual no se recomienda para evitar una posible pérdida de ambos sistemas en caso de fallo eléctrico en la alimentación.

## 7.2 Red de interconexión del GBAS

Junto al diseño de la red de alimentación eléctrica, el GBAS necesita así mismo un cableado que permita interconectar el sistema con un centro de control, de manera que se pueda monitorizar en todo momento la información que se está transmitiendo, así como se permita realizar cualquier tipo de acción sobre el mismo, por ejemplo, en caso de alerta o falla.

No existe una normativa específica por parte de OACI acerca de los requisitos de conexión o mando para el GBAS. No obstante, se optará por aplicar los requisitos existentes para el ILS CAT I, el cual resulta un sistema equivalente al GBAS.

Como se determina en el Anexo 10 Vol I “Telecomunicaciones Aeronáuticas” de OACI [4] :

*“3.1.2.1.1 Las instalaciones ILS de las Categorías de actuación I, II y III proporcionarán indicaciones en puntos de mando a distancia designados sobre el estado de funcionamiento de todos los componentes del sistema ILS en tierra, como sigue:*

*a) para todos los ILS de Categoría II y Categoría III, la dependencia de los servicios de tránsito aéreo que intervenga en el control de la aeronave en la aproximación final constituirá uno de los puntos remotos de control designados y recibirá información sobre el estado operacional de los ILS, con una demora que corresponda a los requisitos del ambiente operacional; y*

*b) para un ILS de Categoría I, si éste proporciona un servicio de radionavegación esencial, la dependencia de servicios de tránsito aéreo que participa en el control de la aeronave en la aproximación final constituirá uno de los puntos remotos de control designados y recibirá información sobre el estado operacional de los ILS, con una demora que corresponda a los requisitos del ambiente operacional.”*

La dependencia a la que hace referencia la norma como control de la aeronave en la aproximación final se corresponde con la torre de control del Aeropuerto de Gran Canaria, cuya posición con respecto a la instalación del GBAS es la siguiente.



Figura 7-5. Ubicación de la torre de control con respecto a los elementos del GBAS

La conexión entre las diferentes antenas, la caseta del GBAS y la torre de control se realizará mediante cableado de fibra óptica. Con el objetivo de reutilizar la infraestructura existente y reducir al mínimo la actuación en el lado aire, se emplearán las canalizaciones existentes en el aeropuerto.

Al tratarse de una zona cercana al Localizador 21R del aeropuerto, se empleará la misma canalización del mismo para tirar el cableado de fibra óptica del GBAS.

No obstante, resultará imprescindible ejecutar un pequeño tramo de nueva canalización en la zona de las antenas RRA y de la caseta, ya que no se dispone de canalización existente en dicha zona.

El nuevo tramo de canalización de fibra óptica conectará las 4 RRA con el Shelter del GBAS. Desde el Shelter, al cual se conecta también la antena VDB, parte un nuevo tramo de fibra que empalma con la canalización existente del Localizador 21R.

Dicha canalización del LOC 21R transcurre paralela a las pistas hasta dirigirse hacia la plataforma, desde donde transcurre hasta alcanzar la Torre de Control.





Figura 7-6. Trazado de la red de información entre GBAS y TWR

La zona de nueva canalización se detalla a continuación.



Figura 7-7. Detalle de nueva canalización de la red de información entre GBAS y TWR

Las dimensiones de la nueva canalización y la longitud total de fibra óptica a introducir son:

- Longitud de nueva canalización: 1250 metros
- Longitud total de cable F.O. a introducir: 2810 metros

La solución propuesta opta por reducir costes y reducir la actuación del proyecto. A pesar de que sería posible trazar una nueva canalización óptima en términos de longitud de cable, sería necesario ejecutar una mayor excavación a través de calles de rodaje, plataforma y viales de acceso aumentando tanto el coste como la afección al aeropuerto.

## 8 CÁLCULO DE CAPACIDAD DE PISTA

Entre los estudios que se realizan dentro de la disciplina de la gestión del tráfico aéreo, surge el concepto de capacidad de pista. OACI define el concepto capacidad de pista [18] como sigue:

**Capacidad de pista:** *Número máximo de movimientos que se puede realizar con la combinación de aeronaves despegado y aterrizando, para un determinado aeródromo, en condiciones operacionales determinadas y para periodos de tiempo específicos.*

En cada aeropuerto dentro de la red AENA, existe una capacidad de pista declarada para unas condiciones climatológicas estándar. Esta capacidad declarada depende en gran medida de las infraestructuras que posea el aeropuerto y del tráfico característico que opere en el mismo. En particular, la capacidad de pista vendrá condicionada por la configuración geométrica de las pistas y calles de rodaje, y por las ayudas a la navegación aérea de las que el campo de vuelos esté dotado.

En los términos que comprende este proyecto, la capacidad del Aeropuerto de Gran Canaria se verá modificada a raíz de la instalación de un nuevo sistema de ayuda a la navegación. En concreto, el GBAS, siendo un sistema de ayuda a la aproximación y aterrizaje, producirá un cambio en los procedimientos de aproximación, a raíz de los cuales se presume un aumento de la capacidad del aeropuerto.

Dicho objetivo, el de corroborar que efectivamente la capacidad del campo de vuelos del aeropuerto se ve incrementada con el GBAS, es el del presente apartado. De modo que, sirva como elemento de validación de este proyecto.

Para ello, inicialmente se presentará la metodología empleada en el cálculo de capacidad de pista. Una vez descrita la metodología se presentará el estado de partida en el cual se basará el desarrollo. Dicho cálculo se realizará tomando como partida la situación futura en la que el GBAS esté completamente operativo. No obstante, el resto de parámetros de los cuales depende el cálculo se mantendrán invariantes. Una vez obtenidos los resultados, estos se confrontarán a los números actuales de capacidad proporcionados por AENA a año 2018.

### 8.1 Metodología de cálculo

El cálculo de la capacidad de pista se realiza de acuerdo a la metodología FAA definida en el *AC 150/5060-5, Airport Capacity and Delay* [19] y las recomendaciones de IATA en el *Airport Development Reference Manual 10th Edition* [20].

Existen cuatro niveles de análisis, en función de los datos de partida disponibles, hipótesis y las restricciones de cálculo:

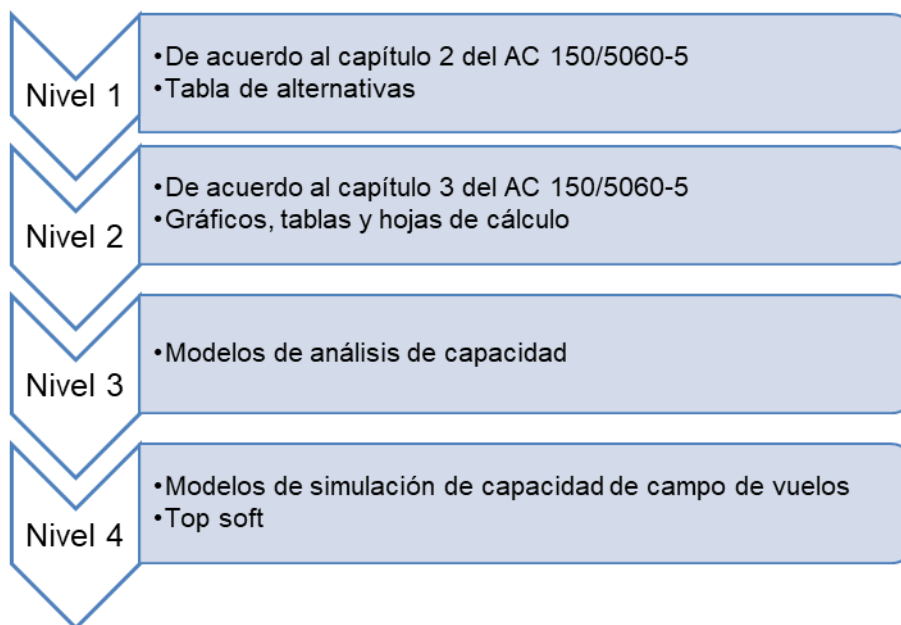


Figura 8-1. Niveles de análisis para el cálculo de la capacidad de pista [19]

El nivel empleado en este estudio para el cálculo de capacidad de pista es el indicado como 3 en la anterior clasificación.

Esta metodología se utiliza para realizar estudios especializados de capacidad del campo de vuelos, y para planificación de aeropuertos de tamaño medio. El principal distintivo de esta metodología es que considera las características de espacio aéreo y la configuración de las calles de rodaje en su cálculo.

Es de gran importancia la selección correcta de los datos de partida necesarios, incluyendo entre estos:

- La mezcla de aeronaves que constituye la flota, incluyendo modelos de aeronaves y no únicamente categorías, que permiten considerar aspectos influyentes sobre los tiempos de rodaje, ocupación, etc.
- Las velocidades de aproximación final de las aeronaves, en función de los modelos de aeronaves.
- La separación entre aeronaves en vuelo, de acuerdo a la estela turbulenta generada tras el paso de aeronaves.
- Las reglas de control de tráfico aéreo y los procedimientos de vuelo.

Es en el último dato de partida en particular, en el que se basará el estudio para corroborar el aumento de capacidad al pasar de aproximación de precisión CAT I mediante ILS únicamente en una de las pistas, a aproximación de precisión CAT I las cuatro cabeceras mediante GBAS.

La determinación de los datos de partida constituye en esta metodología un aspecto primordial para obtener valores de capacidad ajustados a la configuración del campo de vuelos. Cuanto más detallada y precisa sea la recopilación de datos más específicos serán los resultados de los valores de capacidad. Este análisis se realiza mediante hojas de cálculo en las que se implementa el método validado por la FAA.

Como mejora de esta metodología realiza el cálculo de los tiempos de ocupación de pista en aterrizajes (AROT) mediante simulación con el software REDIM 2.1 (Runway Exit Interactive Design Model), software desarrollado por el Centre for Transportation Research at Virginia Tech University (U.S.A.) que es el comúnmente aceptado y utilizado por la FAA. En el Anexo VI: Runway Exit Design Interactive Model (REDIM) se realiza una presentación del software, dentro de la cual se incluyen capturas y descripciones de como se ha realizado el cálculo, así como de los resultados arrojados por el programa.

De esta forma, adicionalmente a los datos de partida descritos, la personalización del modelo de cálculo incluye:

- Características físicas del campo de vuelos: elevación del ARP, orientación, longitud, anchura, elevación y pendientes de la pista, condiciones de rozamiento, configuración, número y ubicación de calles de salida y acceso a pista, etc. Obtenidos del AIP en vigor.
- Aspectos operativos: proporción de operaciones y porcentaje de uso de cabeceras.
- Datos meteorológicos: velocidad y dirección predominante del viento, temperatura de referencia del aeropuerto, porcentaje de pista seca / pista mojada. Obtenidos del Plan Director, AIP y AEMET.
- Peso máximo al despegue y al aterrizaje: considerando una media de análisis de aeronaves, así como la desviación típica en función del factor de ocupación y la carga de pago adicional transportada.

Así, para el cálculo de la capacidad de pista en el nivel 3 se definen, en primer lugar, 4 tiempos, los cuales constituyen el tiempo de ocupación de pista considerando dos operaciones consecutivas, una de llegada y otra de salida:

- **t1** → Aeronave en llegada. Tiempo transcurrido desde que la aeronave pasa por el umbral de pista hasta que deja la pista libre.
- **t2** → Aeronave en salida. Tiempo que emplea la aeronave desde la barra de parada de la calle de rodaje previa al acceso a pista hasta que se alinea con el eje de pista.
- **t3** → Aeronave en salida. Tiempo que tarda la aeronave en recorrer la pista durante el despegue hasta que sobrevuela el extremo de pista.
- **t4** → Aeronave en llegada. Tiempo que emplea la aeronave desde el punto final de aproximación hasta que pasa sobre el umbral de pista.

En la siguiente imagen se incluye una representación gráfica de los cuatro tiempos descritos.

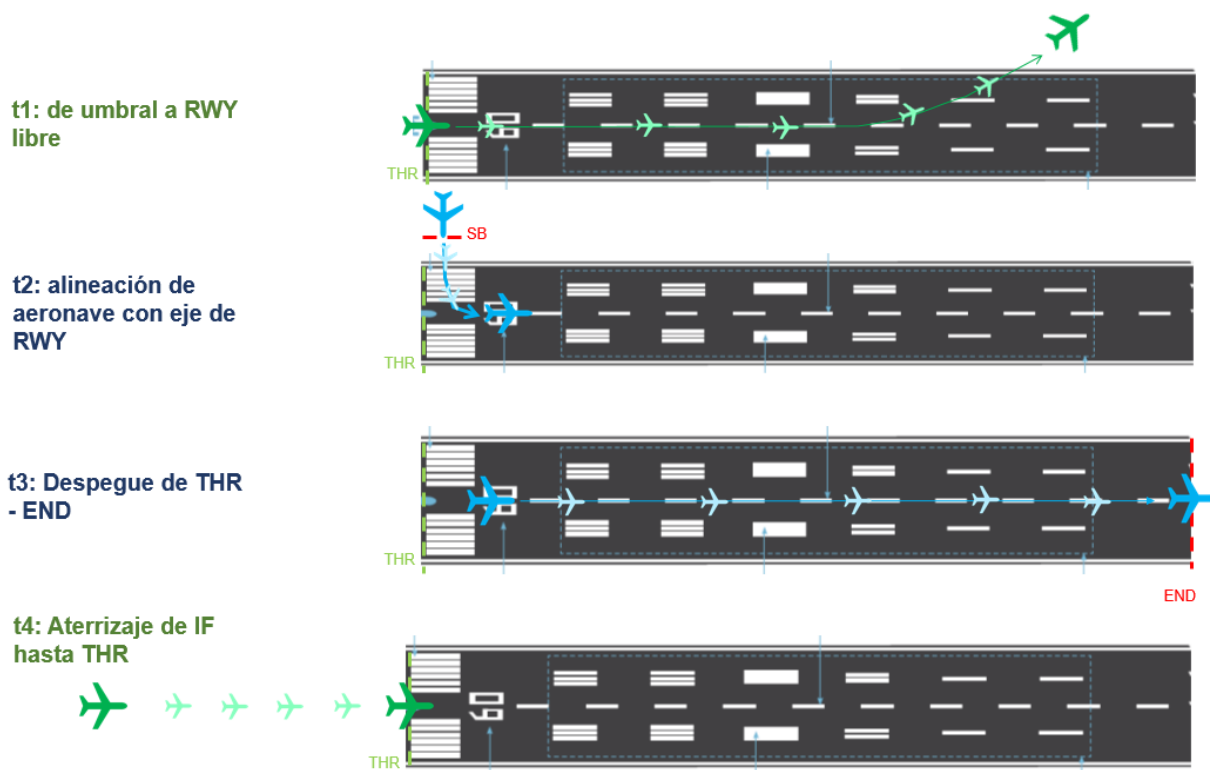


Figura 8-2. Tiempos t1, t2, t3 y t4 de ocupación de pista

Este último tiempo “t4”, será el aspecto clave a considerar en el cálculo, ya que vendrá dado por la distancia de

bloqueo de pista. Dicha distancia de bloqueo se define como:

- **Distancia de bloqueo de pista:** Distancia entre la aeronave y el umbral, a partir de la cual, la pista se considera ocupada por la aeronave que se encuentra en aproximación final, de manera que no se permite ningún tipo de operación diverso hasta que la aeronave en aproximación haya abandonado la misma.

Dicho parámetro viene determinado por el centro de control aéreo del aeródromo. La aeronave en aproximación final es transferida del servicio de control en aproximación al servicio de control de aeródromo, el cual autoriza a la aeronave a aterrizar en pista al sobrevolar el punto que se encuentra a la distancia de bloqueo del umbral.

Esta distancia suele expresarse en unidades de Millas Náuticas (NM), y será el parámetro decisivo para corroborar que la capacidad del campo de vuelos del aeropuerto aumenta con la instalación de los procedimientos GBAS.

La distancia de bloqueo en pista, salvo en aeropuertos con características orográficas complejas, viene determinada por la categoría de aproximación de la cual está dotada la pista. En concreto, en el Aeropuerto de Gran Canaria, la pista 03L/21R está dotada de aproximación instrumental de precisión ILS CAT I en ambas cabeceras, por lo que la distancia de bloqueo en pista se verá afectada tras la transición a GBAS CAT I.

No obstante, en la pista 03R/21L, únicamente se dispone de aproximación de no precisión mediante VOR, DME y TACAN, este último en el caso de aeronaves militares. Este tipo de aproximaciones de no precisión poseen una distancia de bloqueo considerablemente mayor a la de las aproximaciones de precisión CAT I.

En consecuencia, tras la transición a GBAS, mediante la cual las cuatro cabeceras estarán dotadas de CAT I, la distancia de bloqueo de pista se verá reducida para esta pista 03R/21L en concreto, viéndose aumentada su capacidad y en consecuencia la capacidad global del campo de vuelos del aeropuerto.

Finalmente, a partir de la obtención de los cuatro tiempos e incorporando la mezcla de tráfico considerada se obtiene la capacidad de nuestra pista, debiéndose realizar este proceso para cada sentido de operación de la pista y aplicando el porcentaje de uso de las cabeceras que arrojen el resultado final para la pista.

## 8.2 Estado de partida

El estado de partida que servirá como referencia a la hora de comparar la variación en la capacidad del aeropuerto antes y después de la instalación del GBAS será el estado actual a año 2018 del Aeropuerto de Gran Canaria.

Se partirá de la hipótesis de que la geometría del campo de vuelos (calles de rodaje y pistas) se mantiene invariable. Así mismo, los datos de entrada relacionados con la climatología se tomarán del Plan Director del Aeropuerto de Gran Canaria [21] y de las bases de datos elaboradas por AEMET [1].

### 8.2.1 Características del campo de vuelos

Al inicio del proyecto, de manera introductoria, se analizó las características generales del Aeropuerto de Gran Canaria, entre las que se encontraba la geometría del campo de vuelos. No obstante, en este apartado, se describirá con mayor profundidad las características del mismo en cuanto afecta al cálculo de capacidad de pista.

El Aeropuerto de Gran Canaria Consta de dos pistas denominadas 03L/21R y 03R/21L.



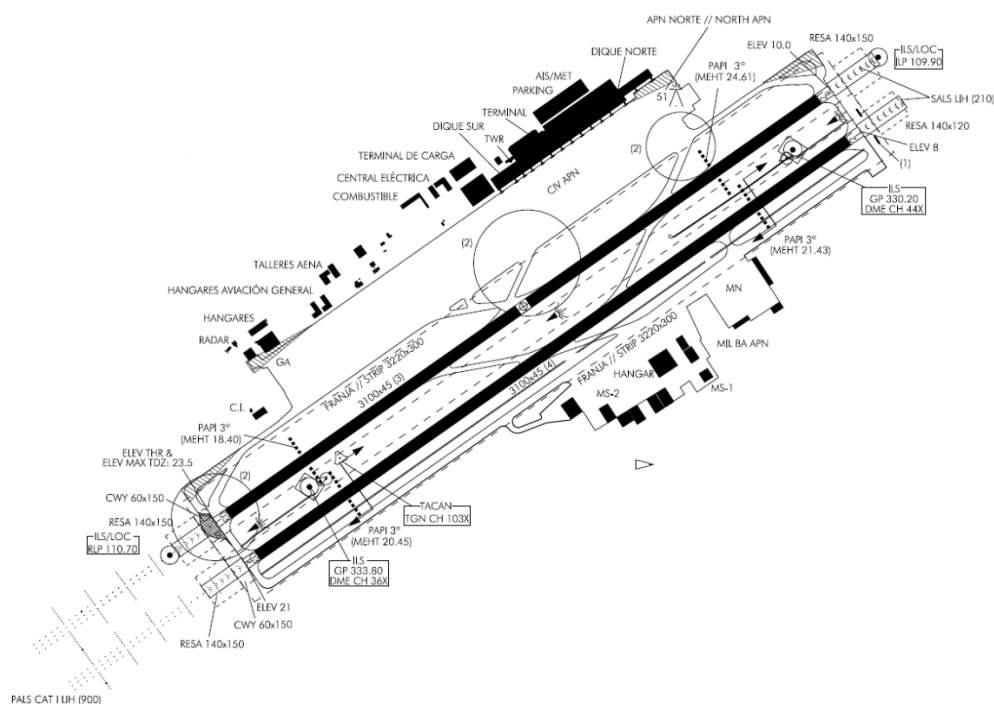


Figura 8-3. Campo de vuelos. Aeropuerto de Gran Canaria

A continuación, se presenta la tabla con las características físicas de las pistas, en cuanto a orientación, dimensiones, coordenadas y elevación de los umbrales, dimensiones de la zona libre de obstáculos, franjas, RESAs y resistencia de los materiales contenida en el AIP del aeropuerto [15].

12. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PISTA					RUNWAY PHYSICAL CHARACTERISTICS					
RWY	Orientación Direction	DIM (m)	THR PSN	THR ELEV TDZ ELEV	SWY (m)	CWY (m)	Franja (m) Strip (m)	OFZ	RESA (m)	RWY/SWY SFC PCN
03L	021.43°GEO 026°MAG	3100 x 45	275507.92N 0152332.43W	THR: 23.7 m / 78 ft TDZ: 23.7 m / 78 ft	No	No	3220 x 300	No	140 x 150	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete PCN 102/F/A/W/T SWY: No
21R	201.43°GEO 206°MAG	3100 x 45	275641.68N 0152250.99W	THR: 9.9 m / 33 ft TDZ: INFO NO AVBL	No	60 x 150	3220 x 300	No	140 x 150	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete PCN 102/F/A/W/T SWY: No
03R	021.42°GEO 026°MAG	3100 x 45	275505.45N 0152325.26W	THR: 21 m / 69 ft TDZ: No	No	No	3220 x 300	No	140 x 120	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete (1) (2) SWY: No
21L	201.43°GEO 206°MAG	3100 x 45	275639.19N 0152243.85W	THR: 8 m / 27 ft TDZ: No	No	60 x 150	3220 x 300	No	140 x 150	Hormigón asfáltico/ Asphaltic concrete (1) (2) SWY: No

Figura 8-4. Características físicas de las pistas. Aeropuerto de Gran Canaria

El perfil longitudinal de ambas pistas, en los cuales se muestra la pendiente longitudinal correspondiente se muestra a continuación.



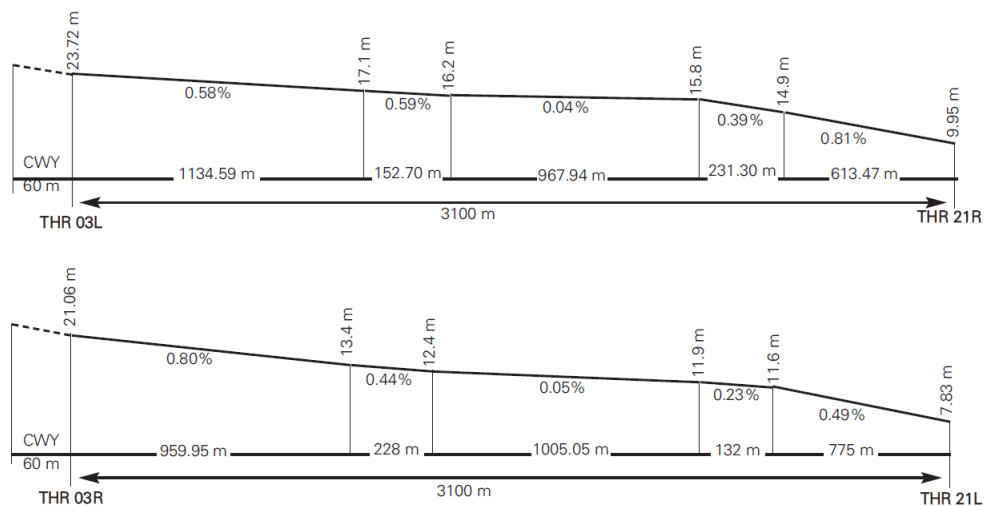


Figura 8-5. Perfil longitudinal de las pistas. Aeropuerto de Gran Canaria

Por último, se especifican las distancias declaradas para ambas pistas, las cuales se muestran en la tabla que sigue a continuación.

13. DISTANCIAS DECLARADAS		DECLARED DISTANCES		
RWY	TORA (m)	TODA (m)	ASDA (m)	LDA (m)
03L	3100	3100	3100	3100
21R	3100	3160	3100	3100
03R	3100	3100	3100	3100
21L	3100	3160	3100	3100
21L INT GCLP-02-C-B (1)	2592	2652	2592	-

Figura 8-6. Distancias declaradas. Aeropuerto de Gran Canaria

8.2.2 Porcentaje de uso de pistas

A la hora de realizar el cálculo global de capacidad del aeropuerto es necesario combinar los números de capacidad de cada una de las 4 pistas existentes en Gran Canaria. Cabe recordar que, a pesar de ser 2 pistas físicas, a efectos de navegación aérea son 4 pistas correspondientes a cada una de las cabeceras.

Dicho valor global de capacidad se denomina capacidad compensada y es función de los porcentajes de utilización de cada cabecera, los cuales se enumeran a continuación.

<b>Cabecera</b>	<b>Operaciones en 2017</b>	<b>Porcentaje de utilización</b>
<b>Configuración Norte</b>	<b>109.279</b>	<b>93,96%</b>
03L	95.480	82,09%
03R	13.799	11,86%
<b>Configuración Sur</b>	<b>7.029</b>	<b>6,04%</b>
21L	707	0,61%
21R	6.322	5,44%

Tabla 8–1. Porcentajes de utilización (año 2017). Pistas 03L/21R y 03R/21L

### 8.2.3 Factores meteorológicos

Uno de los datos de partida necesarios para el cálculo de la capacidad de pista son los parámetros meteorológicos que caracterizan el aeropuerto climáticamente. En concreto se necesitan datos sobre el porcentaje de días de lluvia, los vientos predominantes, altitud y temperatura de referencia de aeródromo.

Según la información proporcionada por AEMET [1], el número medio de días por mes con precipitación superior o igual a 1mm en el Aeropuerto de Gran Canaria es el siguiente.

<b>Mes</b>	<b>Días</b>	<b>Mes</b>	<b>Días</b>
Enero	3.1	Julio	0.0
Febrero	3.0	Agosto	0.1
Marzo	2.3	Septiembre	1.1
Abril	1.3	Octubre	2.3
Mayo	0.3	Noviembre	3.9
Junio	0.1	Diciembre	4.5

Tabla 8–2. Valores medios de días de lluvia al mes en el Aeropuerto de Gran Canaria

En cuanto a los vientos predominantes, a continuación, se presenta la rosa de los vientos del Aeropuerto de Gran Canaria, construida a partir de la información obtenida de Windfinder [22].

<b>Total</b>	<b>Días</b>
Año	22.1
%	6%

Tabla 8–3. Valores medios de días de lluvia al año en el Aeropuerto de Gran Canaria

En cuanto a los vientos predominantes, a continuación, se presenta la rosa de los vientos del Aeropuerto de Gran Canaria, obtenida a partir de la información de Windfinder [22].

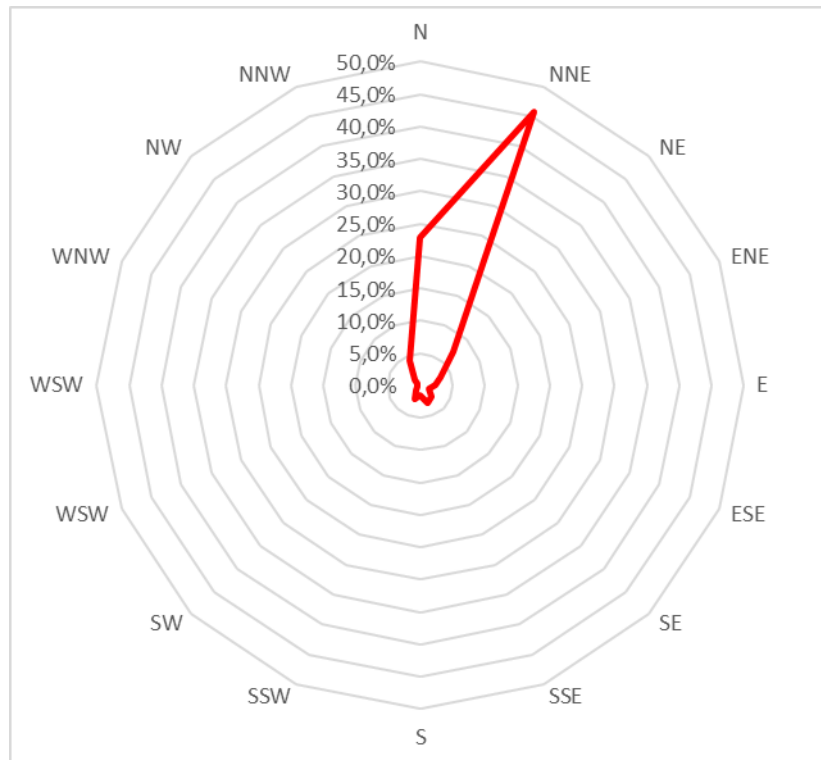


Figura 8-7. Rosa de los vientos. Aeropuerto de Gran Canaria

Como se puede observar, la dirección predominante de los vientos es la NNE correspondiente en grados a la dirección 22,5°. La intensidad media de los vientos es de 16 Kts, lo que equivale a una velocidad de 29,6 km/h.

#### 8.2.4 Separación de aeronaves por estela turbulenta

Otro de los aspectos a tener en cuenta es la separación entre aeronaves en operaciones de llegada y de salida.

Tal y como OACI determina en su documento DOC 4444: Gestión del tránsito aéreo [23].

La expresión “estela turbulenta” se utiliza en este contexto para describir el efecto de las masas de aire en rotación o vórtices que se generan detrás de los extremos de las alas de las grandes aeronaves.

Dichos vórtices pueden suponer un problema para el pilotaje y la navegación de las aeronaves precedentes. La dimensión de éstos viene determinada por el peso, la velocidad y las características del ala de la aeronave.

Con el objetivo de prevenir posibles riesgos para la navegación aérea en las fases de aproximación final a pista de las aeronaves, OACI establece una serie de categorías por estela turbulenta de aeronaves en función de su peso máximo certificado al despegue (MTOW). Para cada combinación de categorías se determina una distancia de separación mínima por estela turbulenta que se debe respetar entre aeronaves en aproximación o despegue de pista.

Las categorías definidas por OACI son las siguientes:

Categoría	MTOW (kg)
Heavy (H)	Mayor de 136.000
Medium (M)	Entre 7000 y 136.000
Light (L)	Menor de 7.000

Tabla 8–4. Clasificación de aeronaves por peso máximo al despegue. Fuente: OACI [23]

Mientras que las mínimas de separación se resumen a continuación.

Aeronave	Aeronave que le sigue	Mínima separación debido a estela turbulenta (NM)
Heavy (H)	Heavy	4
	Medium	5
	Light	6
Medium (M)	Heavy	-
	Medium	3
	Light	5
Light (L)	Heavy	-
	Medium	-
	Light	4

Tabla 8–5. Distancias mínimas de separación por estela turbulenta. Fuente: OACI [23]

### 8.2.5 Separación de aeronaves debida a procedimientos de control aéreo

Uno de los parámetros determinantes a la hora de calcular la capacidad de pista es la separación entre aeronaves impuesta por el ATC debida a procedimientos de control de aproximación.

Dicha separación de aeronaves se traduce en el parámetro “Distancia de bloqueo de pista”, el cual se definió en el apartado “Metodología de cálculo” del presente capítulo como sigue:

- **Distancia de bloqueo de pista:** Distancia entre la aeronave el umbral de pista, a partir de la cual, la pista se considera ocupada por la aeronave que se encuentra en aproximación final/despegue, de manera que no se permite ningún tipo de operación diverso al que la aeronave está llevando a cabo en dicho momento, ya sea despegue o aterrizaje. Dicha distancia suele con la distancia al umbral a la que se produce la transferencia de la aeronave entre las dependencias de control de aproximación (APP) y al control de pista o torre (TWR).

Tal parámetro será fundamental a la hora de obtener las conclusiones del cálculo de capacidad, pues es el principal parámetro que se ve modificado con la instalación del GBAS.

Del mismo modo, existe una distancia mínima de separación entre despegues debida a procedimientos de control, no obstante, esta suele ser menor a la separación por estela turbulenta.

No se disponen datos concretos de la operativa de control aéreo que se sigue en el Aeropuerto de Gran Canaria. No obstante, se tomarán un valor estándar a partir de datos conocidos de diferentes aeropuertos de la red AENA. Partiendo de la infraestructura actual del aeropuerto, las mínimas en llegadas son:

#### **Llegadas:**

- RWY 03L: 4 NM (Aproximación de precisión ILS CAT I)
- RWY 21R: 4 NM (Aproximación de precisión ILS CAT I)
- RWY 03R: 8 NM (Aproximación de no precisión VOR/DME ó LOC con desplazamiento lateral)
- RWY 21L: 8 NM (Aproximación de no precisión VOR/DME ó LOC con desplazamiento lateral)

Con la infraestructura GBAS instalada y operativa, las mínimas se reducirían a:

- RWY 03L: 4 NM (Aproximación de precisión ILS ó GBAS CAT I)
- RWY 21R: 4 NM (Aproximación de precisión ILS ó GBAS CAT I)
- RWY 03R: 4 NM (Aproximación de precisión GBAS CAT I)
- RWY 21L: 4 NM (Aproximación de precisión GBAS CAT I)

En cuanto a las salidas, las mínimas se mantienen constantes:

#### **Salidas**

- RWY 03L: 3 NM
- RWY 21R: 3 NM
- RWY 03R: 3 NM
- RWY 21L: 3 NM

### **8.2.6 Mezcla anual de tráfico**

Así como se analizó de forma introductoria en el Apartado 1.3.3, se dispone de datos de tráfico clasificados por tipo de aeronave para el año 2016. Este conjunto de datos resulta fundamental a la hora de calcular la capacidad de pista, dado que según las características de la aeronave (MTOW, velocidad de aproximación, potencia de frenado, etc.), la distancia necesaria para aterrizar/despegar y en consecuencia el tiempo de ocupación de pista variará, caviendo consigo la capacidad final de la pista.

A la hora de realizar el cálculo de capacidad, se clasificarán las aeronaves según hace OACI [9]. Dicha clasificación se divide en 5 posibles categorías según la envergadura y la anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal. Estas son:

Letra de clave	Envergadura	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal
A	Hasta 15m (exclusive)	Hasta 4,5m (exclusive)
B	Desde 15m hasta 24m (exclusive)	Desde 4,5m hasta 6m (exclusive)
C	Desde 36m hasta 52m (exclusive)	Desde 6m hasta 9m (exclusive)
D	Desde 36m hasta 52m (exclusive)	Desde 9m hasta 14m (exclusive)
E	Desde 52m hasta 65m (exclusive)	Desde 9m hasta 14m (exclusive)
F	Desde 65m hasta 80m (exclusive)	Desde 14m hasta 16m (exclusive)

Tabla 8–6. Categorías de aeronave. Fuente: OACI [9]

A la hora de realizar el análisis mediante el software REDIM, lo ideal sería introducir como dato de partida toda la serie de aeronaves que operan en LPA acompañadas del número de operaciones cada una.

No obstante, REDIM realiza el cálculo aplicando el Método de Montecarlo, un método no determinista empleado para aproximar expresiones matemáticas complejas y de alto coste computacional, como las que se derivan de dicho cálculo.

Por ello, como datos de partida, únicamente se pueden introducir 10 tipos de aeronaves diferentes. Como se analizó en el Apartado 1.3.3, las aeronaves predominantes son las de clave C.

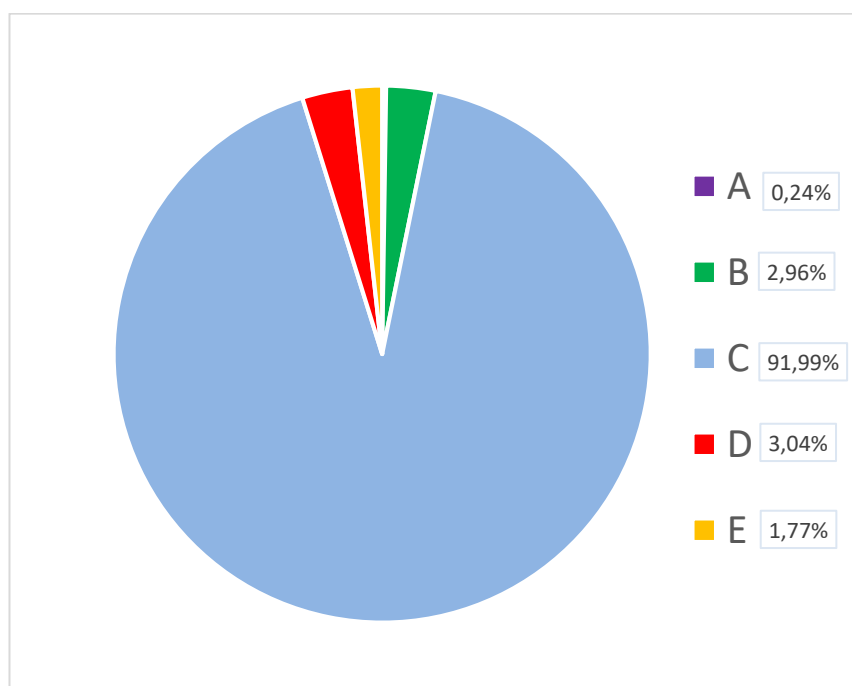


Figura 8-8. Clasificación de aeronaves por letra clave según el número de operaciones. Aeropuerto de Gran Canaria 2016

Como se observa, las aeronaves de clave C (tipo A320 o B737) predominan enormemente sobre el resto. Por este motivo, de la muestra de 10 aeronaves que se tomará, la mayor parte de ellas será de clave C. No obstante,

también se incluirán aeronaves del resto de categorías de modo que sea una muestra representativa. Así mismo, se destaca como en 2016 no hubo ninguna operación de aeronave clave F.

Las aeronaves seleccionadas para la muestra se corresponden con las aeronaves con mayor número de operaciones en cada categoría. Así mismo, se han agrupado como una misma aeronave, los modelos que pertenecen a una misma familia.

La muestra adoptada es la siguiente.

Aeronave	Letra de clave	N.º de operaciones (2016)	Porcentaje sobre el total de operaciones
Diamond DA42	A	160	0,16 %
Beechcraft 1900	B	2.413	2,43 %
Embraer RJ145	B	208	0,21 %
Boeing 737-800	C	29.818	30,05 %
ATR 72	C	34.897	35,17 %
Airbus A320	C	21.841	22,02 %
CRJ 900	C	4.923	4,96 %
Boeing 757-300	D	2.902	2,92 %
Boeing 767-300	D	370	0,38 %
Airbus A330-200	E	1.685	1,70 %

Tabla 8–7. Muestra de aeronaves empleada en el cálculo REDIM

### 8.2.7 Condicionantes operativos

Como se expuso anteriormente en el Apartado 1.3.2, el AIP del Aeropuerto de Gran Canaria [15] determina que existen dos tipos de configuraciones posibles a la hora de segregar los despegues y aterrizajes por las cuatro cabeceras posibles.

- Configuración Norte:
  - Llegadas por RWY 03L
  - Salidas por RWY 03R
- Configuración Sur:
  - Llegadas por RWY 21R
  - Salidas por RWY 21L





Figura 8-9. Configuraciones de operación de aeronaves en LPA.

Dada la presencia de vientos predominantes de componente sur, la configuración predominante es la configuración norte. De este modo, la mayoría de los despegues se realizan por la cabecera 03R, mientras que los aterrizajes se realizan por la cabecera 03L para la cual existen procedimientos de aproximación de precisión CAT I tipo ILS.

Los porcentajes de utilización de cada una de las cuatro cabeceras se muestran en la siguiente tabla. Se trata de valores obtenidos para el año 2016, de manera que concuerden con los datos de operaciones por aeronave, los cuales son del mismo año.

Configuración	Cabecera	Número de operaciones	Porcentaje sobre el total
Norte	03L	95.480	82,09%
	03R	13.799	11,86%
Sur	21L	707	0,61%
	21R	6.322	5,44%

Tabla 8–8. Porcentaje de uso por cabecera en el Aeropuerto de Gran Canaria. Año 2016

### 8.3 Resultados del cálculo de capacidad de pista

Una vez determinados los datos de partida para el cálculo se desarrollará el cálculo de capacidad de pista. En primer lugar, se analizará la capacidad por cabecera. Posteriormente, se aplicarán los porcentajes de utilización de cada una de las cabeceras para obtener la capacidad de cada pista. Finalmente, se obtendrá la capacidad total del campo de vuelos del Aeropuerto de Gran Canaria.

Como se mencionó en el Apartado 8.1 Metodología de cálculo, para obtener los resultados de capacidad se ha empleado el software REDIM. En el Anexo VI: Runway Exit Design Interactive Model (REDIM) se incluyen las capturas de pantalla y los resultados arrojados por el programa.

#### 8.3.1 Pista 03L/21R

La pista 03L/21R es la que absorbe el mayor número de operaciones a lo largo del año, como se muestra en la Tabla 8–8. Porcentaje de uso por cabecera en el Aeropuerto de Gran Canaria. Año 2016. Esto es debido a que es la única de las pistas dotada con ILS y por lo tanto aproximaciones de precisión CAT I. Así mismo, al ser la

pista más próxima a la plataforma, en períodos de menor tráfico los controladores optan por emplear esta pista tanto para despegues como aterrizajes, reduciendo así el tiempo de rodaje de las aeronaves que debieran despegar por la pista 03R/21L.

8.3.1.1 Cabecera 03L

En la siguiente imagen se representan los flujos de operaciones a través de la cabecera 03L, siendo representados en azul los despegues y en verde los aterrizajes.



Figura 8-10. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 03L

**Despegues**

A través de la cabecera 03L, las aeronaves en salida se alinean con el eje de pista a través de las calles de rodaje R1L y R1R. Preferentemente, el controlador da permiso a la aeronave a través de la R1L, de modo que se reduzca la distancia y en consecuencia el tiempo de rodaje.

**Aterrizajes**

Existen 3 posibles opciones para abandonar pista una vez la aeronave aterriza por la cabecera 03L. Las calles de salida son S2, S3 y R9R.

Según los datos obtenidos de REDIM, los porcentajes de abandono de pista por cada calle de salida son los siguientes.

Condición de pista	Calle de salida	Porcentaje sobre el total
Seca	S2	38,19 %
	S3	61,81 %
	R9R	0 %
Mojada	S2	37,77 %
	S3	59,82 %
	R9R	2,41 %

Tabla 8–9. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 03L

### 8.3.1.2 Cabecera 21R

La operativa que siguen las aeronaves al aterrizar o despegar por 21R es la siguiente.



Figura 8-11. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 21R

#### Despegues

A través de la cabecera 03R, las aeronaves en salida se alinean con el eje de pista únicamente a través de la calle de rodaje R9R.

#### Aterrizajes

En este caso, existen dos posibles calles de rodaje para abandonar la pista. Una primera calle de salida rápida S1 y la calle de rodaje R1L que conecta con el extremo de pista.

Según los datos obtenidos de REDIM, los porcentajes de abandono de pista por cada calle de salida son los siguientes.

Condición de pista	Calle de salida	Porcentaje sobre el total
Seca	S1	41,13 %
	R9R	58,87 %
Mojada	S1	38,56 %
	R9R	61,44 %

Tabla 8–10. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 21R

### 8.3.1.3 Capacidad de pista compensada RWY 03L/21R

Los porcentajes de utilización de cada cabecera de esta pista se obtienen a partir de la Tabla 8–8. Porcentaje de uso por cabecera en el Aeropuerto de Gran Canaria. Año 2016 y son los siguientes.

Cabecera	Porcentaje de uso
03L	87,52 %
21R	12,48 %

Tabla 8–11. Porcentajes de uso de ambas cabeceras de pista 21R/03L

Tras efectuar la comparación de los tiempos de ocupación de pista con los tiempos impuestos por las separaciones entre aeronaves debidas tanto a estela turbulenta de la aeronave precedente, como a procedimientos de control, y llevar a cabo la aplicación de la mezcla de tráfico considerada, se obtiene el siguiente resultado:

**CAPACIDAD RWY 03L/21R → 28 Operaciones/hora**

La capacidad anterior se corresponde con una distribución de operaciones 50/50, alternándose de forma consecutiva un despegue con un aterrizaje, modo equilibrado. Sin embargo, si se varía dicha distribución operativa, la capacidad se ve modificada igualmente.

- Capacidad 100% salidas = 24 salidas/hora
- Capacidad 100% llegadas = 39 llegadas/hora
- Capacidad equilibrada (50% salidas-50% llegadas) = 30 operaciones/hora

A partir del siguiente gráfico, desarrollado en base a la metodología de la FAA, se representa la forma en la que la distribución de operaciones afecta a la capacidad de la pista:

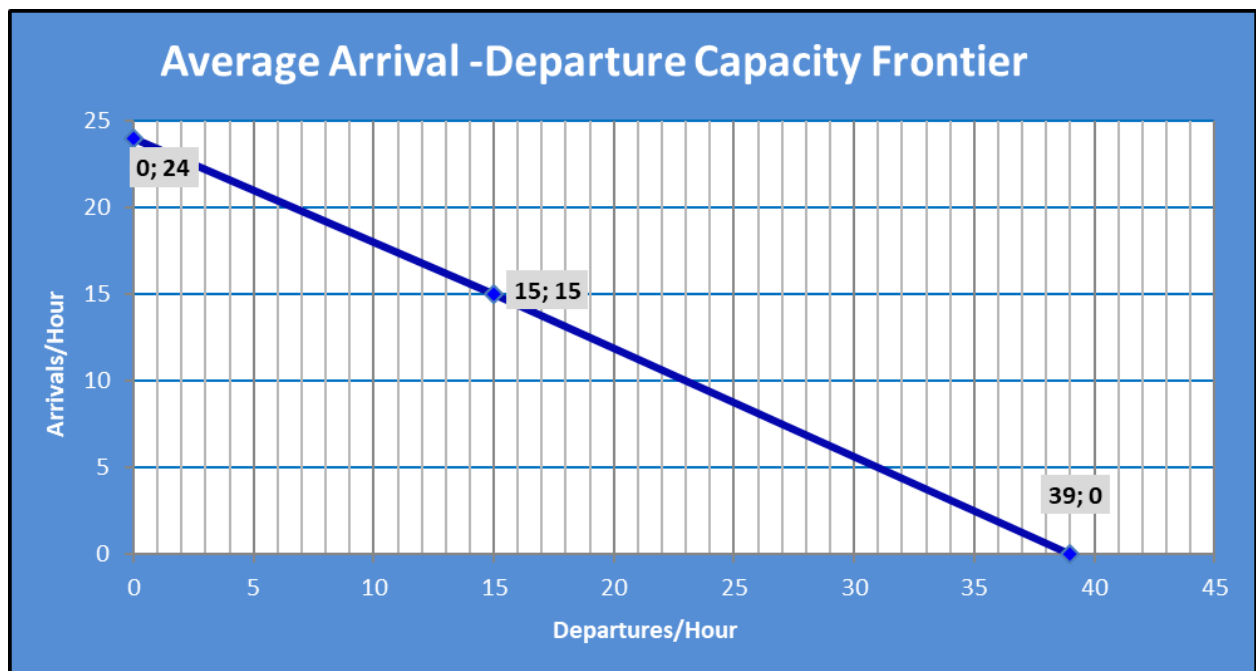


Figura 8-12. Capacidad de pista 03L/21R en función de la distribución de operaciones

### 8.3.2 Pista 03R/21L

La pista 03R/21L, como se observa en la Tabla 8–8. Porcentaje de uso por cabecera en el Aeropuerto de Gran Canaria. Año 2016 posee unos porcentajes de uso muy reducidos con respecto a la RWY 03L/21R. Los principales motivos de este nivel de uso tan bajo son dos.

En primer lugar, se trata de la pista más alejada de la plataforma comercial. Lo que supone la necesidad de una mayor distancia de rodaje durante el taxi, que se traduce en mayor tiempo y consumo para los operadores.

Así mismo, al no disponer de procedimientos aproximación de precisión, prácticamente la totalidad de los aterrizajes se realizan por la otra pista, quedando esta únicamente para despegues cuando la pista 03L/21R esté

ocupada.

Tras la instalación del GBAS, este último hecho quedará subsanado, estando ambas pistas dotadas de aproximaciones de precisión CAT I. De este modo, se espera que el porcentaje de utilización de esta pista aumente, aprovechando así su potencial y en general el de todo el campo de vuelos.

En este caso, se realizarán dos cálculos de capacidad. Uno con GBAS y otro sin GBAS, de manera que se aprecie el aumento sustancial de la capacidad, que se verá reflejado en un aumento del número de llegadas/hora a las que se le puede dar cabida en esta pista.

### 8.3.2.1 Cabecera 03R

En la siguiente imagen se representan los flujos de operaciones a través de la cabecera 03R, siendo representados en azul los despegues y en verde los aterrizajes.



Figura 8-13. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 03R

#### Despegues

A través de la cabecera 03L, las aeronaves en salida se alinean con el eje de pista a través de la calle de rodaje S4.

#### Aterrizajes

Existen 2 posibles opciones para abandonar pista una vez la aeronave aterriza por la cabecera 03R. Según la distancia de frenado, la aeronave puede optar por salir de pista por la calle de salida rápida S7, o bien rodar hasta final de pista y abandonarla por S7.

Según los datos obtenidos de REDIM, los porcentajes de abandono de pista por cada calle de salida son los siguientes.

Condición de pista	Calle de salida	Porcentaje sobre el total
Seca	S6	80,68 %
	S7	19,32 %
Mojada	S6	52,64 %
	S7	47,36 %

Tabla 8–12. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 03R

### 8.3.2.2 Cabecera 21L

La operativa que siguen las aeronaves al aterrizar o despegar por 21L es la siguiente.





Figura 8-14. Flujos de despegues y aterrizajes por cabecera 21L

**Despegues**

El acceso a pista por la cabecera 21L se realiza únicamente a través de la calle de rodaje S7.

**Aterrizajes**

En este caso, de nuevo existen dos posibles calles de rodaje para abandonar la pista. Una primera calle de salida rápida S5 y la calle de rodaje S4 que conecta con el extremo de pista.

Según los datos obtenidos de REDIM, los porcentajes de abandono de pista por cada calle de salida son los siguientes.

Condición de pista	Calle de salida	Porcentaje sobre el total
Seca	S5	48,71 %
	S4	51,29 %
Mojada	S5	39,85 %
	S4	60,15 %

Tabla 8–13. Porcentajes de abandono de pista tras aterrizaje por cabecera 21L

**8.3.2.3 Capacidad de pista compensada RWY 03L/21R**

Los porcentajes de utilización de cada cabecera de esta pista se obtienen a partir de la Tabla 8–8. Porcentaje de uso por cabecera en el Aeropuerto de Gran Canaria. Año 2016 y son los siguientes.

Cabecera	Porcentaje de uso
03R	95,12 %
21L	4,88 %

Tabla 8–14. Porcentajes de uso de ambas cabeceras de pista 21L/03R

Como se ha mencionado, se han analizado dos casos. En primer lugar, la situación actual en la que los procedimientos de aproximación por ambas cabeceras son de no precisión, y por lo tanto la separación entre aeronaves debida a procedimientos de control es de:

- RWY 03R: 8 NM (Aproximación de no precisión VOR/DME ó LOC con desplazamiento lateral)

- RWY 21L: 8 NM (Aproximación de no precisión VOR/DME ó LOC con desplazamiento lateral)

Y, en segundo lugar, la situación en la que el GBAS esté en funcionamiento, donde estas distancias de separación en llegadas se reducen a:

- RWY 03R: 4 NM (Aproximación de precisión GBAS CAT I)
- RWY 21L: 4 NM (Aproximación de precisión GBAS CAT I)

Tras efectuar la comparación de los tiempos de ocupación de pista con los tiempos impuestos por las separaciones entre aeronaves debidas tanto a estela turbulenta de la aeronave precedente, como a procedimientos de control, y llevar a cabo la aplicación de la mezcla de tráfico considerada, se obtiene el siguiente resultado:

**CAPACIDAD RWY 03R/21L SIN GBAS → 22 Operaciones/hora**

**CAPACIDAD RWY 03R/21L CON GBAS → 30 Operaciones/hora**

La capacidad anterior se corresponde con una distribución de operaciones 50/50, alternándose de forma consecutiva un despegue con un aterrizaje, modo equilibrado.

El aumento en la capacidad debido al GBAS se ve reflejado en un aumento en el número de aterrizajes por hora que se pueden realizar. Esto es debido a la reducción de la distancia de separación en llegadas de 8 NM a 4 NM gracias a los procedimientos de aproximación de precisión CAT I del GBAS.

Si varía la distribución operativa, la capacidad se ve modificada igualmente. Al igual que se realizó anteriormente.

Los resultados son los siguientes

Con GBAS:

- Capacidad 100% salidas = 23 salidas/hora
- Capacidad 100% llegadas = 42 llegadas/hora
- Capacidad equilibrada (50% salidas-50% llegadas) = 30 operaciones/hora

Sin GBAS

- Capacidad 100% salidas = 14 salidas/hora
- Capacidad 100% llegadas = 42 llegadas/hora
- Capacidad equilibrada (50% salidas-50% llegadas) = 22 operaciones/hora

Se representa a continuación el siguiente gráfico, desarrollado en base a la metodología de la FAA, en el que se muestra como varía la capacidad de pista en función de la distribución de operaciones. En este caso se incluyen dos gráficos, correspondientes a los casos con y sin GBAS.



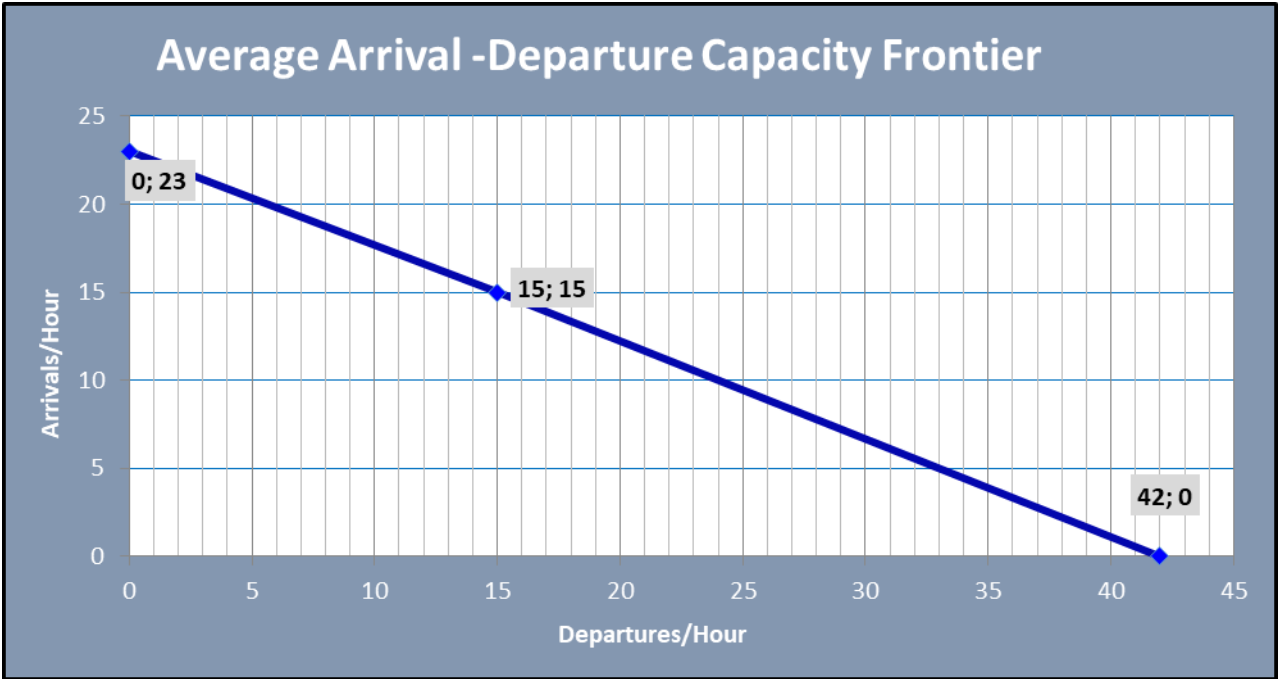


Figura 8-15. Capacidad de pista 03R/21L con GBAS en función de la distribución de operaciones

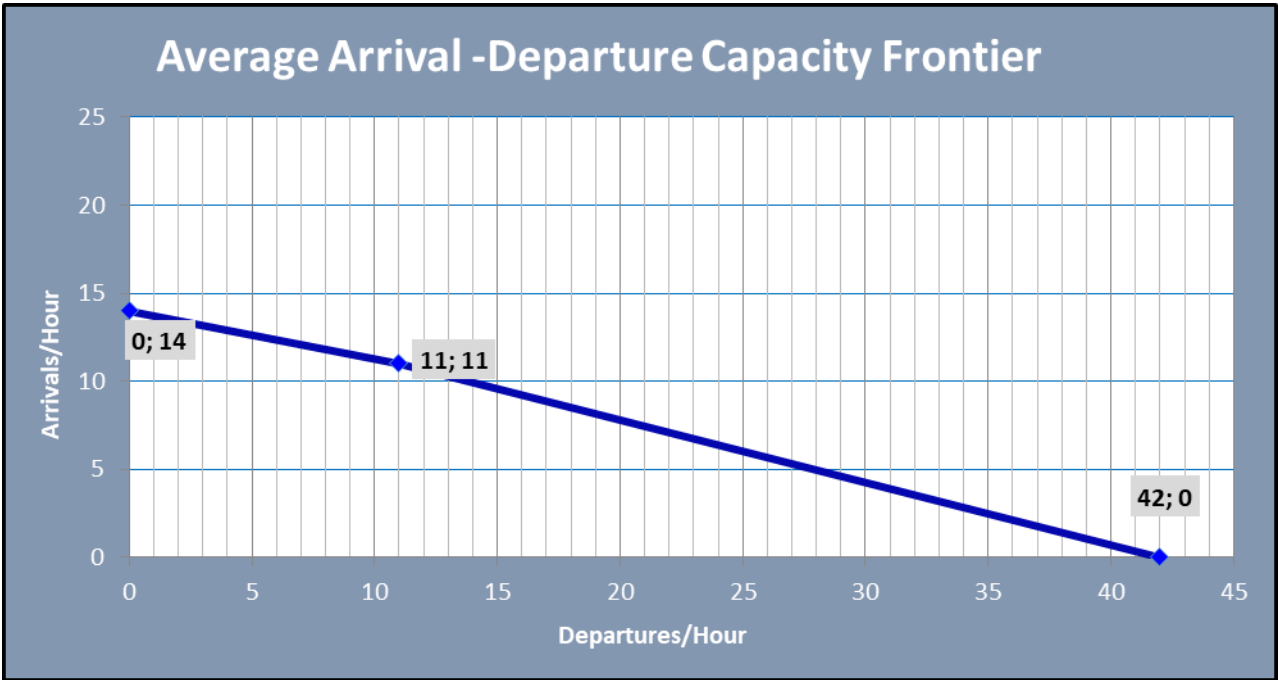


Figura 8-16. Capacidad de pista 03R/21L sin GBAS en función de la distribución de operaciones

Es evidente como la capacidad se ve aumentada tras la instalación del GBAS, provocado por un aumento en la capacidad en términos de llegadas/hora, manteniéndose constante el valor de salidas/hora.

### 8.3.3 Análisis de resultados

Una vez expuestos los resultados se procede a sacar las pertinentes conclusiones de los mismos.

Como se ha podido observar, la capacidad de la pista 03L/21R se mantiene invariante. Esto es debido a que, desde el punto de vista operacional, no existe cambio alguno en dicha pista. Al estar previamente dotada de dos ILS, uno en cada cabecera, el GBAS no supone novedad alguna. Únicamente actúa como sistema redundante, de modo que, en caso de fallo del ILS en cualquiera de las dos cabeceras, pueda seguir manteniéndose un nivel CAT I en aproximaciones instrumentales de precisión.

El principal aporte del GBAS, que realmente permite aumentar la capacidad, se refleja en la pista 03R/21L. Dado que esta pista no poseía sistemas de ayuda a la aproximación de precisión, la capacidad de la misma en términos de aterrizajes era reducida.

Esto es debido a la distancia de separación que los controladores deben mantener entre operaciones consecutivas en las que ocurra un aterrizaje. Previo al GBAS, únicamente se disponía de aproximaciones instrumentales mediante TACAN, VOR/DME, o LOC desplazado desde la pista paralela.

Al instalar el GBAS, se dota a esta pista de aproximaciones instrumentales de precisión CAT I, reduciéndose dicha distancia de separación mencionada de 8 NM a 4 NM.

Para resumir, en la siguiente tabla se muestra la variación en términos de capacidad de pista. Dichos números se corresponden con capacidad de pista compensada, es decir, 50% aterrizajes y 50% despegues, intercalando cada aterrizaje con un despegue.

Pista	Capacidad sin GBAS	Capacidad con GBAS
03L/21R	28	28
03R/21L	22	30

Tabla 8–15. Variación en la capacidad de pista. Pre y post GBAS.

## 9 PRESUPUESTO

Con el objetivo de realizar una estimación económica del coste total que puede suponer dotar al aeropuerto del GBAS.

Para elaborar el presupuesto se ha empleado el software Presto, el cual permite estructurar el presupuesto de manera que se determinen las mediciones de cada una de las partidas de forma clara y sencilla.

Dado que en la actualidad existen diferentes proveedores de sistemas GBAS, se trata de un presupuesto aproximado cuyo objetivo es que sirva de manera orientativa.

El proveedor elegido en este caso ha sido Honeywell, dado que se trata del fabricante más consolidado en este tipo de sistemas GLS. Honeywell fue el primer proveedor certificado por la FAA para la provisión de sistemas GBAS en los aeropuertos americanos. Así mismo, es el principal proveedor en Europa. La mayoría de los aeropuertos que disponen de GBAS (Málaga, Bremen, Frankfurt, etc.) trabajan con Honeywell.

El GBAS ofrecido por Honeywell se comercializa bajo el nombre de *SmartPath® Ground-Based Augmentation System*. Existen varias versiones del sistema debido a la evolución que ha ido experimentando a lo largo del tiempo.

La versión que se comercializa actualmente, y que está presente en más de 25 aeropuertos en todo el mundo es la *SmartPath® SLS-4000*, aprobada por la FAA como GLS CAT I. En el siguiente enlace se puede encontrar información comercial acerca del sistema:

<https://aerospace.honeywell.com/en/~media/aerospace/files/brochures/c61-1663-000-000-smartpathprecisionlandingsystem-bro.pdf>

Así mismo, se prevé que en los próximos años se apruebe la versión *SLS-5000*, ya en desarrollo, y que estará certificada como GLS CAT II/III.

El presupuesto elaborado se compone tres capítulos:

1. GBAS: incluye todos los estudios, análisis y elementos necesarios para la instalación del GBAS. Este capítulo ha sido elaborado en base a una oferta económica elaborada por Honeywell en 2013 para el *SmartPath® SLS-4000*. Por lo tanto, se trata de una estimación aproximada, dado que es posible que los precios hayan variado. No obstante, se considera una estimación bastante precisa, dado que esas variaciones no deberán ser tan significantes.
2. Obra civil: incluye todos los trabajos relacionados con la obra civil necesaria para instalar el sistema, y que no se incluye dentro de la oferta realizada por Honeywell. En ello se incluye el trazado de nuevas canalizaciones o adecuación del terreno entre otros.
3. Instalación eléctrica y comunicaciones: en este tercer capítulo se incluyen todos los equipos y materiales que deberá adquirir el aeropuerto para llevar a cabo la alimentación eléctrica y la conexión del GBAS con la torre de control y que no se incluyen en la oferta de Honeywell. A modo de ejemplo, se incluyen transformadores, cableado, etc.

A continuación, se muestra el informe generados en Presto que incluye cada una de las partidas que lo componen.



## PRESUPUESTO

### CAPÍTULO 01 GBAS

#### 1.01 ud ESTUDIO PRELIMINAR

En el estudio preliminar basa sobre un análisis del aeropuerto incluyendo configuración geométrica, planes de desarrollo, zonas libres de obstáculos, ubicación de las radioayudas existentes, ubicación de los sistemas de alimentación eléctrica, futuras modificaciones proyectadas, etc. El objetivo de este estudio es identificar los potenciales lugares de emplazamiento del sistema, el cual se analizará posteriormente durante la evaluación del entorno.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
1,00	50.000,00 €	50.000,00 €

#### 1.02 ud EVALUACIÓN DEL ENTORNO

La evaluación del entorno consiste en la recopilación de una serie de datos in situ para su posterior análisis. Mediante sistemas de recepción GPS portátil, los cuales se instalan en cada una de los potenciales puntos de instalación del sistema identificados en el estudio preliminar. Se recopilan datos durante 24-48h. Posteriormente se realiza un análisis de cada potencial emplazamiento mediante los datos recopilados para determinar el rendimiento operativo que tendría el sistema en cada uno de los posibles emplazamientos. El análisis determina cual será la posición óptima del sistema estableciendo el emplazamiento final en colaboración con el cliente.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
1,00	183.000,00 €	183.000,00 €

#### 1.03 ud ESTACIÓN TERRESTRE GBAS (SMARTPATH)

Corresponde al conjunto de elementos del sistema físico (hardware), su correspondiente sistema informático (software) y documentación asociada al subsistema terrestre del GBAS. Incluye 1 año de garantía y soporte por parte del proveedor del GBAS (Honeywell).

Total Cantidad	Precio	Total Importe
1,00	1.200.000,00€	1.200.000,00 €

#### 1.04 ud INSTALACIÓN, TESTEO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Incluye la instalación de los equipos del Smartpath, puesta en marcha y posterior validación y testeo del sistema. No incluye toda la serie de obra civil requerida para la instalación del sistema, ni el material necesario para su integración con el resto de sistemas aeroportuarios (alimentación, conexión, etc.)

Total Cantidad	Precio	Total Importe
1,00	240.000,00 €	240.000,00 €

<b>TOTAL CAPÍTULO 01 GBAS .....</b>	<b>1.673.000,00 €</b>
-------------------------------------	-----------------------



## PRESUPUESTO

### CAPÍTULO 02 OBRA CIVIL

#### 2.01 m<sup>2</sup> DESPEJE Y DESBROCE DEL TERRENO

Despeje, desbroce y limpieza superficial de terreno desarbolado por medios mecánicos hasta una profundidad de 10cm. Incluido el destocoado de árboles, arbustos y plantas. Incluso carga y transporte a zona de acopio. Incluidos p.p. del sobre-coste por trabajos nocturnos, equipos de iluminación y maquinaria de repuesto.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
464,00	0,27 €	125,28 €

#### 2.02 m<sup>2</sup> SOLERA DE HORMIGÓN

Solera de hormigón armado de 20 cm de espesor, para pavimento industrial o decorativo, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y malla electrosoldada ME 20x20 Ø 5-5 B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080 como armadura de reparto, colocada sobre separadores homologados, extendido y vibrado mecánico mediante extendidora, con acabado superficial mediante fratasadora mecánica.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
150,00	26,80 €	4.020,00 €

#### 2.03 m<sup>3</sup> BASE GRANULAR DE GRAVA

Subbase granular con grava de cantera de piedra granítica, Ø40/70 mm, y compactación al 96% del Proctor Modificado con medios mecánicos, puesta en obra, extendida y compactada, incluso preparación de la superficie de asiento, en capas de 15/30 cm. de espesor, medido sobre perfil. Incluido sobre coste por trabajos nocturnos, equipos de iluminación y maquinaria de repuesto.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
40,00	49,70 €	1.988,00 €

<b>TOTAL CAPÍTULO 02 OBRA CIVIL .....</b>	<b>6.133,28 €</b>
---	-------------------



## PRESUPUESTO

### CAPÍTULO 03 INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y COMUNICACIONES

#### SUBCAPÍTULO 03.01 RED DE COMUNICACIÓN

##### 3.01.01 m CABLE DE FIBRA ÓPTICA

Cable dieléctrico para exteriores, de 8 fibras ópticas monomodo en tubos activos holgados de polibutileno tereftalato (PBT) y tubos pasivos cableados recubiertos con material bloqueante del agua, elemento central de refuerzo, cubierta interior de polietileno, cabos de fibra de vidrio como elemento de protección anti-rodedores y de refuerzo a la tracción y cubierta exterior de polietileno.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
4.100,00	4,93 €	20.213,00 €

##### 3.01.02 m CANALIZACIÓN DE HORMIGÓN POLÍMERO

Construcción de un metro lineal de canalización compuesta por piezas prefabricadas de hormigón polímero, colocadas sobre una base de hormigón de HM-20 de 10 cm. de espesor, rematada lateralmente con bordes de 18 cm de hormigón. Incluso excavación y preparación del terreno. Totalmente instalada, incluida excavación y preparación del terreno.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
1.300,00	14,24 €	18.512,00 €

##### 3.01.03 ud PUNTO DE DISTRIBUCIÓN DE FIBRA ÓPTICA

Suministro y colocación de kit completo de conectores para cable primario compuesto por conector unipolar macho y conector unipolar hembra. Incluidos útiles, elementos y medios auxiliares. Totalmente conexionado, instalado y ubicado correctamente.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
5,00	36,66 €	183,30 €



## PRESUPUESTO

### SUBCAPÍTULO 03.02 INSTALACIÓN ELÉCTRICA

#### 3.02.01 m CABLE CU RZ1-K 0,6/1 KV 1X50 MM2

Cable industrial RZ1-K CPR de tensión asignada 0,6/1kV, aislado con polietileno reticulado (XLPE) y cubierta de Poliolefina. Conductor cobre flexible electrolítico. Indicado para transporte y distribución de energía eléctrica en instalaciones fijas protegidas o no como locales de pública concurrencia, hospitales, escuelas, centros comerciales y aeropuertos. Cumplen con los criterios de clasificación de productos de la construcción según Reglamento CPR 305/2011 y la norma EN 50575.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
2.000,00	4,32 €	8.640,00 €

#### 3.02.02 m CANALIZACIÓN DE HORMIGÓN POLÍMERO

Construcción de un metro lineal de canalización compuesta por piezas prefabricadas de hormigón polímero, colocadas sobre una base de hormigón de HM-20 de 10 cm. de espesor, rematada lateralmente con bordes de 18 cm de hormigón. Incluso excavación y preparación del terreno. Totalmente instalada, incluida excavación y preparación del terreno.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
2.000,00	14,24 €	28.480,00 €

#### 3.02.03 ud CENTRO DE TRANSFORMACIÓN PARA GBAS

Centro de Transformación para electrificación del sistema de control del GBAS. Incluye todos los elementos necesarios. Entre estos: aseta prefabricada de hormigón armado, transformador 25kVA, cabina alimentación a CT (desde anillo), cabina de protección del transformador (<100kVA), cabina interconexión de barras, elementos de seguridad, consumibles para conexiones, caja de empalmes, cableado necesario, señal de aviso de riesgo eléctrico, materiales y trabajos complementarios.

Total Cantidad	Precio	Total Importe
1,00	90.000,00 €	90.000,00 €

<b>TOTAL CAPÍTULO 03 INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y</b>	<b>166.028,30 €</b>
--	---------------------

<b>TOTAL PRESUPUESTO.....</b>	<b>1.845.161,58 €</b>
-------------------------------	-----------------------



En resumen, el presupuesto aproximado para instalar un GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria es de 1.845.000 €. Como se observa en la descomposición por capítulos, la gran parte del presupuesto global está compuesta por el suministro e instalación del GBAS, siendo una parte muy reducida la obra civil e insignificante la instalación tanto eléctrica como comunicaciones.

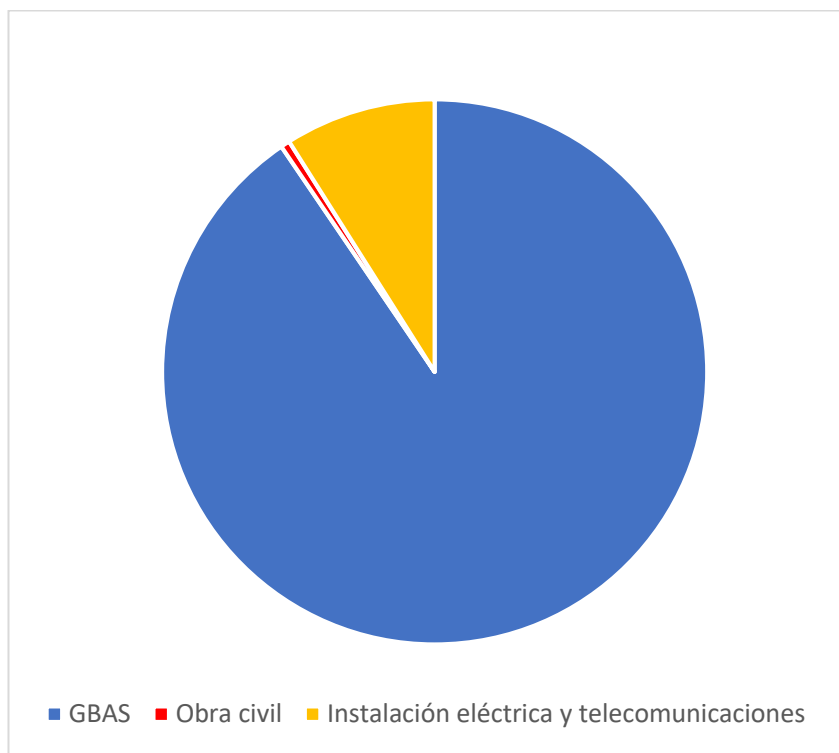


Figura 9-1. Composición del presupuesto para la instalación del GBAS

## 9.1 Viabilidad económica. GBAS vs ILS

A la hora de realizar la estimación económica del coste de la instalación GBAS, es necesario analizar la viabilidad del proyecto. Para ello, se ha comparado el coste del GBAS con el de instalar uno o varios sistemas ILS, verificando que, a largo plazo, resulta más ventajoso la inversión en GBAS.

En primer lugar, cabe destacar que, para dotar de aproximaciones instrumentales de precisión CAT I en todas las cabeceras, sería necesario instalar dos nuevos sistemas ILS, uno en la cabecera 03R y otro en la 21L. Por el contrario, con un único GBAS es posible dar el mismo servicio.

En base a diferentes fuentes [10] [24] [25], se ha estimado tanto los costes de instalación como los de mantenimiento medio por año para ambos sistemas. Los datos obtenidos son los siguientes.

### GBAS

- Instalación completa: 1.845.000€
- Mantenimiento anual: 30.000€

### ILS

- Instalación completa: 900.000€
- Mantenimiento: 40.000€

Proyectando la inversión a largo plazo, hasta el año 2030, se obtienen los siguientes resultados

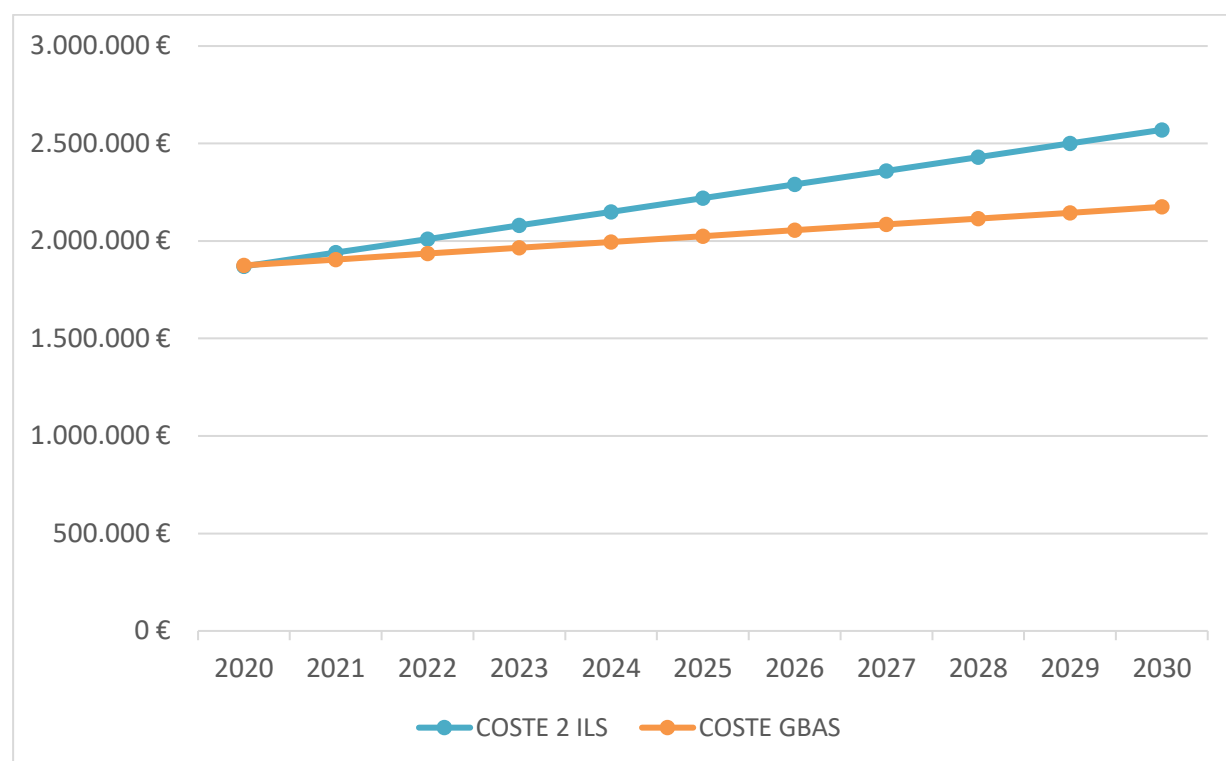


Figura 9-2. Comparativa inversión GBAS vs ILS

Se observa como inicialmente la inversión en el GBAS es similar a la de dos ILS. No obstante, conforme se avanza en el tiempo, y debido al menor coste de mantenimiento del GBAS, la diferencia entre ambos sistemas aumenta. Para el año 2030, se prevé que el ahorro económico de instalar el GBAS sea de aproximadamente medio millón de euros.

No obstante, también es necesario valorar el hecho de que se pueda prescindir de uno de los ILS ya existentes en la pista 03L/21R. A medida que el GBAS se asiente en el mercado, tal y como se espera. En ese sentido, tanto Eurocontrol como la Comisión Europea apuestan por una inversión en este tipo de sistemas digitales más modernos que sustituyan a los actuales. En esa línea, se espera que para 2030, el número de aeropuertos con GBAS haya aumentado considerablemente y del mismo modo el número de aerolíneas que lo usen.

En definitiva, realizar dicha inversión actual supone no solo una ventaja en el presente, sino también una apuesta de futuro a corto-medio plazo.

# ANEXOS

## Anexo I: Listado de estaciones GBAS en el mundo

En el presente anexo se enumera la lista completa de estaciones GBAS a fecha de 2018, alrededor del mundo, según datos obtenidos de flygls.net

### GBAS CAT I certificados para vuelos comerciales

Bremen (EDDW)	Bovanenkovo (USDB)
Frankfurt (EDDF)	Chita (UIAA)
Málaga (LEMG)	Kemerovo (UNEE)
Zúrich (LSZH)	Mineralnye Wody (URMM)
Newark (KEWR)	Moscow - Domodedovo (UDD)
Houston (KIAH)	Moscow Sheremetyevo (UUEE)
Melbourne (YMML)	Tyumen (USTR)
Sydney (YSSY)	

### GBAS CAT I en proyecto de implementación

Brisbane (YBBN)	Perth (YPPH)
Dubái (DWC)	Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport
Kolkata (VECC)	John F. Kennedy International Airport
Mumbai (VABB)	Warszawa (EPWA)
Múnich (EDDM)	Krakow (EPKK)
New Delhi (VIDP)	

### Instalaciones GBAS dedicadas a investigación y desarrollo

Anoka County, MN (KANE)	Sendai (RJSS)
Braunschweig (EDVE)	Seoul Gimpo Airport (RKSS)
Cedar Rapids	Charleston
Guam (PGUM)	Tianjin Binhai International Airport
Olathe, KS (KIXD)	New Chitose Airport
Palermo (LICJ)	

GBAS CAT I no publicado

Moses Lake (KMWH)	Khatanga (UOHH)	Podkamennaya Tunguska (UNIP)
St. Helena (FHSB)	Kirensk (UIKK)	Polarny (UERP)
Rio de Janeiro (SBGL)	Krasnodar (URKK)	Rostov-on-Don (URRR)
Shanghai Pudong	Krasnoyarsk (UNKL)	Sabetta
Chennai Airport, India	Kyzyl (UENK)	Sakhalin (UHSS)
Punta Cana (MDPC)	Kurgan (USUU)	Salekhard (USDD)
Anapa (URKA)	Magadan (UHMM)	Samara (UWWW)
Arkhangelsk (ULAA)	Mirny (UERR)	Sochi
Baikal (UIUU)	Moscow Ostafyevo (UUMO)	Surgut (USRR)
Barnaul (UNBB)	Murmansk (ULMM)	St. Petersburg Pulkovo (ULLI)
Blagoveshchensk (UHBB)	Nadym (USDD)	Tomsk (UNTT)
Bratsk (UIBB)	Neryungi (UELL)	Uytash (URML)
Ekaterinburg (USSS)	Nogliki (UHSN)	Vladikavkaz (URMO)
Gelendzhik (URKG)	Norilsk (UOOO)	Vladivostok
Gorno-Altaysk (UNBG)	Novolazarevskaya	Vologda (ULWW)
Irkutsk (UIII)	Novosibirsk (UNNT)	Yakutsk (UEEE)
Kaliningrad (UMKK)	Noyabrsk (USRO)	Yoshkar-Ola (UWKJ)
Kaluga (UUBC)	Penza (UWPP)	Yuzhno-Kurilsk (UHSM)
Kazan (UWKD)	Perm (USPP)	
Khabarovsk (UHBB)	Pevek (UHMP)	

Prototipos GBAS CAT II/III

FAA TC Atlantic City	Ramenskoye (UUBW)
Oslo	Toulouse (LFBO)
Frankfurt-(EDDF) CAT III	Barcelona–El Prat Airport
New Ishigaki Airport	

GBAS bajo estudio para su implementación

Dakar (GOOY)	Lisboa (LPPT)
Hong Kong (VHHH)	San Francisco International Airport
London Heathrow	Santiago de Chile (SCEL)
Gran Canaria (GLCP)	

## Anexo II: Parámetros para el cálculo de las contribuciones de error en pseudodistancia

### Parámetros de designador GAD

Letra designador GAD	$\theta_i$ (grados)	$\theta_0$ (grados)	$a_0$	$a_1$	$a_2$
A	$\geq 5$	14,3	0,5	1,65	0,08
B	$\geq 5$	15,5	0,16	1,07	0,08
C	$> 35$	15,5	0,15	0,84	0,04
C	de 5 a 35	16,1	0,24	0	0,04

Tabla A–1. Parámetros asociados al designador del GAD para el cálculo de la contribución del subsistema terrestre al error de pseudodistancia. Fuente: OACI [4]

### Parámetros de designador AAD

Letra designador GAD	$El_i$ (grados)	$\theta_0$ (grados)	$a_0$	$a_1$
A	$\geq 5$	14,3	0,5	1,65
B	$\geq 5$	15,5	0,16	1,07

Tabla A–2. Parámetros asociados al designador del AAD para el cálculo de la contribución del subsistema terrestre al error de pseudodistancia. Fuente: OACI [4]

### Anexo III: Proyección de los errores del dominio de la pseudodistancia al dominio de la posición

Como se determinó en el desarrollo de las correcciones diferenciales la pseudodistancia corregida se expresa como:

$$\hat{\rho}_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} - c \cdot \Delta t_r + \Delta \rho_i = \rho_i + \Delta \rho_i \quad (\text{A-1})$$

Donde:

- $x_i, y_i, z_i$  representa la posición del i-ésimo satélite GNSS expresada en coordenadas cartesianas (ECEF)
- $x_r, y_r, z_r$  representa la posición real del receptor, calculada mediante la señal GNSS y expresada en coordenadas cartesianas (ECEF)
- $\Delta t_r$  es el error por desviación de reloj.
- $\Delta \rho_i$  es el error en la pseudodistancia generado por las diferentes fuentes de error (ionosfera, relatividad, reflexiones, etc.) para el satélite i-ésimo
- $\rho_i$  es el valor de distancia real entre el receptor y el satélite i-ésimo
- $c$  representa la velocidad de propagación de la luz en el vacío

En consecuencia, la posición verdadera del receptor y el error del reloj son desconocidos, pero pueden ser expresados mediante la suma de una estimación más una componente incremental:

$$\begin{aligned} x_r &= \hat{x}_r + \Delta x_r \\ y_r &= \hat{y}_r + \Delta y_r \\ z_r &= \hat{z}_r + \Delta z_r \\ t_r &= \hat{t}_r + \Delta t_r \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

Aplicando un desarrollo de Taylor de primer orden a la función de posición verdadera del receptor  $\rho_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}$  se llega a:

$$\rho_i = \hat{\rho}_i + \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{x}_r} \cdot \Delta x_r + \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{y}_r} \cdot \Delta y_r + \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{z}_r} \cdot \Delta z_r + \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{t}_r} \cdot \Delta t_r \quad (\text{A-3})$$

Desarrollando los términos en derivadas parciales se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{x}_r} &= - \frac{x_i - \hat{x}_r}{R_i} = -a_{xi} \\ \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{y}_r} &= - \frac{y_i - \hat{y}_r}{R_i} = -a_{yi} \\ \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{z}_r} &= - \frac{z_i - \hat{z}_r}{R_i} = -a_{zi} \\ \frac{\partial \hat{\rho}_i}{\partial \hat{t}_r} &= -c \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

Siendo  $R_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_r)^2 + (y_i - \hat{y}_r)^2 + (z_i - \hat{z}_r)^2}$ . Sustituyendo en la ecuación (5-4) y (5-3) se deduce:

$$\Delta \rho_i = \hat{\rho}_i - \rho_i = a_{xi} \cdot \Delta x_r + a_{yi} \cdot \Delta y_r + a_{zi} \cdot \Delta z_r + c \cdot \Delta t_u \quad (\text{A-5})$$

De este modo, para un conjunto completo de  $n$  medidas de pseudodistancia la ecuación anterior se puede expresar de forma matricial como sigue:

$$\overline{\Delta\rho} = H\overline{\Delta x} \quad (\text{A-6})$$

Donde:

$$\overline{\Delta\rho} = \begin{pmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_n \end{pmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & c \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & c \end{bmatrix} \quad \overline{\Delta x} = \begin{pmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta t_r \end{pmatrix} \quad (\text{A-7})$$

Dicho sistema es resoluble aplicando el criterio de mínimos cuadrados. No obstante, eso supondría que los errores en la medida de la pseudodistancia son idénticos para todos los satélites lo cual no es cierto. Por este motivo se pondera la relación mediante la matriz de covarianza  $W$  del vector aleatorio  $\overline{\Delta\rho}$ , la cual es diagonal que contiene los términos de varianza estadística del error total en pseudodistancia corregida  $\sigma_i^2$ . Siendo  $\overline{\Delta\rho} \sim N(0, W)$ .

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A-8})$$

Cabe destacar que se trata de una matriz diagonal dado que se supone que los errores en pseudodistancia entre satélites diferentes se encuentran incorrelados.

Se aplica la ponderación multiplicando por  $(H^T W^{-1})$  en ambos lados de la ecuación:

$$(H^T W^{-1}) \overline{\Delta\rho} = (H^T W^{-1}) H \overline{\Delta x} \quad (\text{A-9})$$

Despejando el vector  $\overline{\Delta x}$  se obtiene:

$$\overline{\Delta x} = (H^T W^{-1} H)^{-1} H^T W^{-1} \overline{\Delta\rho} = K \overline{\Delta\rho} \quad (\text{A-10})$$

Simplificando en un solo término  $K = (H^T W^{-1} H)^{-1} H^T W^{-1}$ .

Finalmente, tras la ponderación se obtiene  $\overline{\Delta x}$ , el vector aleatorio que contiene las variables aleatorias del error en posición y de reloj. Dado que las variables aleatorias que forman  $\overline{\Delta x}$  son de distribución gaussiana y media cero,  $\overline{\Delta x}$  también lo será:

$$\overline{\Delta x} \sim N(0, C) \quad (\text{A-11})$$

Por definición, la covarianza de un vector aleatorio se expresa mediante una matriz  $C$  de la siguiente forma.

$$C = cov(\overline{\Delta x}) = E[\overline{\Delta x} \overline{\Delta x}^T] = E[K \overline{\Delta\rho} \overline{\Delta\rho}^T K^T] = K \cdot E[\overline{\Delta\rho} \overline{\Delta\rho}^T] \cdot K^T \quad (\text{A-12})$$

Teniendo en cuenta que  $W = cov(\overline{\Delta\rho}) = E[\overline{\Delta\rho} \overline{\Delta\rho}^T]$ , se obtiene;



$$C = KWK^T \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & c \cdot \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & c \cdot \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & c \cdot \sigma_{zt}^2 \\ c \cdot \sigma_{xt}^2 & c \cdot \sigma_{yt}^2 & c \cdot \sigma_{zt}^2 & c^2 \cdot \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad (A-13)$$

Cada término representa:

- $\sigma_x$  = desviación estándar del error de posición en la dirección j.
- $\sigma_y$  = desviación estándar del error de posición en la dirección y.
- $\sigma_z$  = desviación estándar del error de posición en la dirección z.
- $\sigma_t$  = desviación estándar del error de reloj.
- $\sigma_{jk}$  = correlación cruzada entre las componentes del error de posición j y k. Con  $j, k = x, y, z$  tal que  $j \neq k$
- $\sigma_{jt}$  = correlación cruzada entre las componentes del error de posición j el error de reloj t. Con  $j = x, y, z$ .

## Anexo IV: Superficies limitadoras de obstáculos

Las superficies limitadoras de obstáculos, comúnmente conocidas como SLO, son un conjunto superficies imaginarias establecidas alrededor de un aeródromo o instalación radioeléctrica de ayuda a la navegación con el objetivo de mantener un área libre de obstáculos que permita llevar a cabo con seguridad las operaciones de aeronaves previstas y evitar que los aeródromos queden inutilizados por la presencia de obstáculos en sus alrededores.

De este modo, las SLO establecen los límites hasta donde los objetos u obstáculos pueden proyectarse en el espacio aéreo.

Dentro del territorio español se aplican las Servidumbres Aeronáuticas, equivalentes a las Superficies de Limitación de Obstáculos establecidas por OACI en su Anexo 14 Volumen 1 [9]. Dichas Servidumbres Aeronáuticas son en gran medida similares a las SLO, y vienen publicadas según el Real Decreto 297/2013 de Servidumbres Aeronáuticas [16]. Dichas servidumbres se clasifican en servidumbres de aeródromo y servidumbres radioeléctricas.

### Servidumbres aeronáuticas de aeródromo

Se establecen alrededor del aeródromo para proteger los movimientos de las aeronaves en despegue y aterrizaje. Éstas son las siguientes.

- **Superficie horizontal interna:** superficie contenida en un plano horizontal a 45 metros por encima del punto de referencia de aeródromo y constituida por un círculo con centro en la vertical de dicho punto. El radio de este círculo será:
  - 4000 metros cuando el aeródromo tenga alguna pista con la letra clave A, B o C.
  - 2500 metros cuando alguna pista sea de letra clave D y no haya ninguna de la letra de clave A, B o C.
  - 2000 metros cuando sea clave E.
- **Superficie cónica:** superficie troncocónica de revolución sobre el eje vertical que pasa por el punto de referencia de aeródromo. El límite inferior será la intersección de la superficie cónica con la superficie horizontal interna. El límite superior de la superficie cónica estará contenido en un plano horizontal situado a:
  - 100 metros sobre la superficie horizontal interna cuando el aeródromo tenga alguna pista con clave A o B.
  - 75 metros sobre la superficie horizontal interna cuando el aeródromo tenga alguna pista con clave C y no las haya con clave A o B.
  - 55 metros sobre la superficie horizontal interna cuando el aeródromo tenga alguna pista con letra clave D y no las haya con letra clave A, B o C.
  - 35 metros sobre la superficie horizontal interna cuando la pista sea de clave E.
- **Superficie de aproximación:** superficie plana inclinada que parte del umbral de pista en el sentido de la aproximación. El límite inferior de la superficie de aproximación será una línea horizontal contenida en el plano vertical que contenga a su vez el borde interior del área de aproximación. La elevación del límite inferior será igual a la del punto medio del umbral. Las pendientes o pendiente de la superficie de aproximación, medidas sobre la horizontal en el plano vertical que contenga el eje de

la pista, serán las que se especifican en la Tabla A–4, excepto en el área de aproximación por instrumentos, en la que la superficie de aproximación será horizontal a partir de ciento cincuenta metros por encima de la elevación del umbral, o bien a partir del plano horizontal que pase por la parte superior de cualquier objeto que determine la altitud mínima en la aproximación final, siempre que esta altitud sea superior a ciento cincuenta metros sobre la elevación del umbral.

- **Superficie de transición:** conjunto de superficies oblicuas establecidas a ambos lados de una pista extendiéndose desde el borde de la franja de la pista hacia fuera. La pendiente de la superficie de transición, medida en un plano vertical perpendicular al eje de pista, será:
  - Del 14,3% cuando la letra clave de la pista sea A, B o C.
  - Del 20,0% cuando dicha pista sea de clave D o E.

El límite exterior de la superficie de transición se determinará por su intersección con el plano que contenga a la superficie horizontal interna.

- **Superficie de ascenso al despegue:** superficie plana inclinada que parte del umbral de pista en el sentido de la aproximación. El límite inferior de la superficie de subida en el despegue será una línea horizontal contenida en el plano horizontal que contenga a su vez el borde interior del área de subida en el despegue. El límite inferior tendrá la elevación del punto más alto de la prolongación del eje de pista, comprendido en la distancia de:
  - 60 metros a partir del umbral, para las pistas con letras de clave A, B o C, o
  - 30 metros para las letras de clave D o E.

En el caso de que exista zona libre de obstáculos, la elevación del límite inferior será la del punto más alto de dicha zona. La pendiente de la superficie de subida en el despegue, medida sobre la horizontal contenida en el plano vertical al eje de pista, no será mayor que la especificada en la Tabla A–3.

Clave de referencia de pista	A	B	C	D	E
Distancia del borde interior al extremo de pista	60 m	60 m	60 m	30 m	30 m
Anchura del borde interno	180 m	180 m	180 m	80 m	60 m
Divergencia a cada lado	12,5%	12,5%	12,5%	10%	10%
Anchura del borde externo	1200 m	1200 m	1200 m	580 m	380 m
Longitud	15000 m	15000 m	15000 m	2500 m	1600 m
Pendiente	2% a 1,6%	2% a 1,6%	2% a 1,6%	4% a 1,6%	5% a 1,6%

Tabla A–3. Características de la superficie de ascenso al despegue. Fuente: BOE [17]

Clave de referencia de pista	A	B	C	D	E
Distancia del borde interior al extremo de pista	60 m	60 m	60 m	30 m	30 m
Anchura del borde interno	300 m	300 m	300 m	300 m	300 m
Divergencia a cada lado	15%	15%	15%	15%	15%
Longitud	15000 m	15000 m	15000 m	15000 m	15000 m
Pendiente de los primeros 3000 metros	2%	2%	2%	2%	2%
Pendiente más allá de los primeros 3000 metros	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%

Tabla A-4. Características de la superficie de aproximación. Fuente: BOE [17]

A continuación, se incluye, a modo ilustrativo, una representación de las servidumbres aeronáuticas arriba descritas.

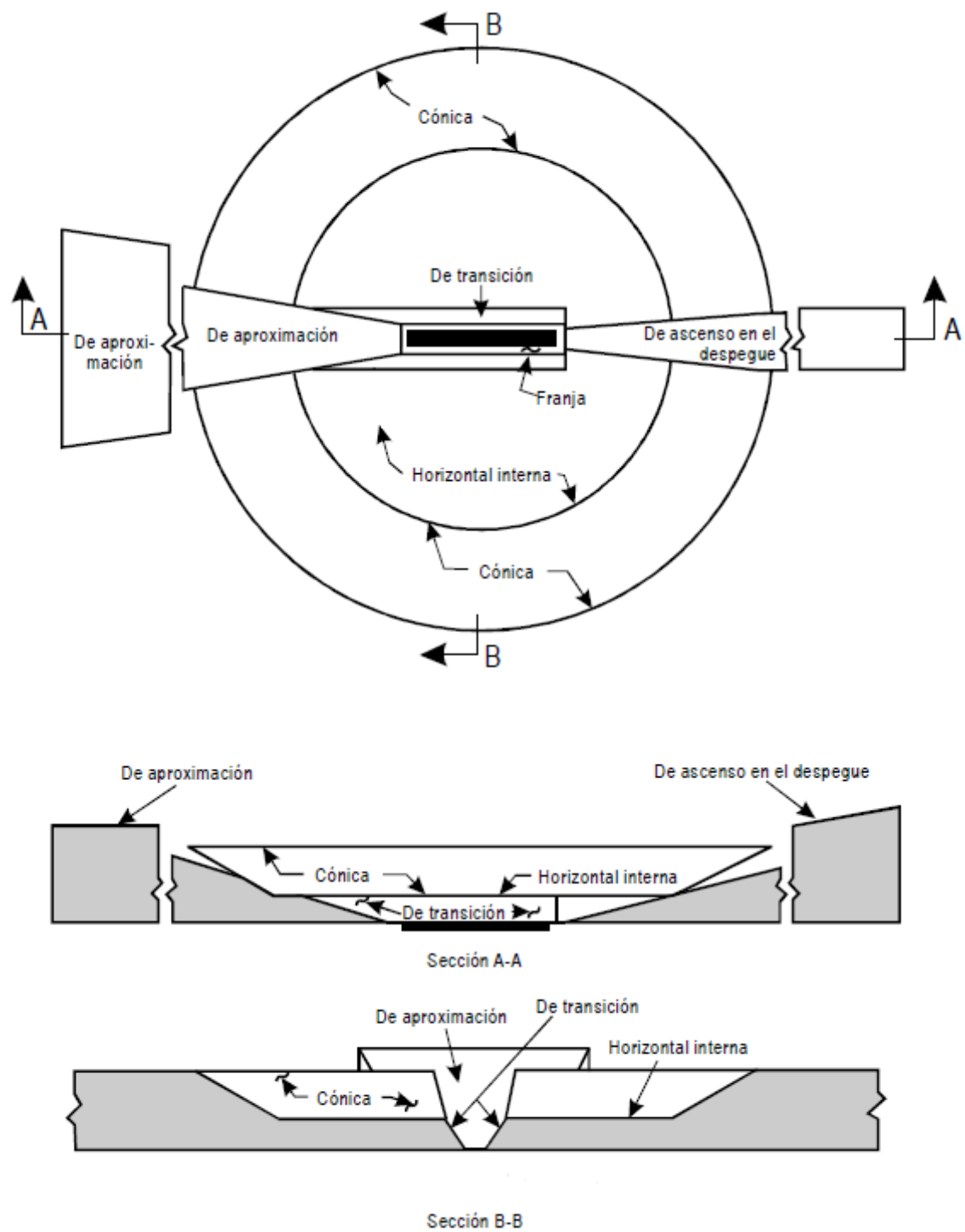


Figura A-1. Superficies limitadoras de obstáculos. Fuente: OACI [4]

# Anexo VI: Runway Exit Design Interactive Model (REDIM)

REDIM es un software informático desarrollado por la FAA en los años 90 con el objetivo de diseñar calles de salida rápida en aeropuertos.

El modelo empleado utiliza ecuaciones cinemáticas para caracterizar la dinámica del aterrizaje de las aeronaves. Mediante un algoritmo dinámico de aproximación en tiempo polinómico es capaz de determinar los tiempos de ocupación de pista (ROT) durante el aterrizaje para una mezcla de aeronaves concreta. Dicho tiempo se corresponde con el valor  $t_4$ , desarrollado en el Apartado 8.1 Metodología de cálculo.

Para ello posee una base de datos interna en la que se almacenan las características de diversas aeronaves que comúnmente frecuentan los aeropuertos a nivel mundial.

A continuación, se muestran una serie de capturas de pantalla del cálculo de capacidad de pista realizado en el Apartado 8.3.1.

En esta primera imagen se muestra la mezcla de aeronaves empleada en el cálculo, a partir de los datos de tráfico del Aeropuerto de Gran Canaria. Para cada aeronave, se introduce en valores porcentuales sobre 100 el número de operaciones que cada una tuvo sobre el total.

```

UPI&SU<<<< RUNWAY EXIT DESIGN INTERACTIVE MODEL >>>>UCR
INPUT the percentages of aircraft: Press <Tab> key after editing.
Peak Period Operation Mix

TERPS-A      TERPS-B      TERPS-C      TERPS-D      TERPS-E
BE-F33A      :0      BE-58      :0      Aero RJ85      :0      A330-300      :1.70      F-4      :0
CE-172      :0      BE-300      :0      A300-600      :0      A340-200      :0
CE-182      :0      BE-400      :0      A310-300      :0      B-747-200      :0
CE-208      :0      CE-402      :0      A320-200      :22.00      B-747-400      :0
CE-210P      :0      CE-421      :0      B717-200      :0      B767-300      :0.37
PA-28-161      :0      CE-550      :0      B727-200      :0      B777-200      :0
PA-28-236      :0      CE-650      :0      B737-200      :0      C-5A      :0
PA-32-301      :0      CRJ-200      :0      B737-300      :0      DC-8-73      :0
PA-38-112      :0      DA-200      :0      B737-800      :30.00      DC-10-30      :0
PA-46-310P      :0.16      DHC-7      :0      B757-200      :22.92      MD-11      :0
DHC-8      :35.10      Bae-146-200      :0      CL-601-3A      :0
Do-328      :0      CL-601-3A      :0      DC-9-32      :0
Do-728      :4.96      Fokker-100      :0
EMB-120      :0      Gulfstream      :0
EMB145      :0.21      IAI-1124      :0
Lear-31      :0      Lear55      :0
PA42-1000      :0      MD-83      :0
Saab-340      :0      MD-87      :0
SA227      :2.43
Shorts-330      :0

NO. of Aircraft = 10
TOTAL Percentage = 99.98

```

Figura A-2. Mezcla de aeronaves empleada en el cálculo de capacidad de pista mediante REDIM.

Una vez definida la mezcla se introducen los valores de partida, como se muestra a continuación.

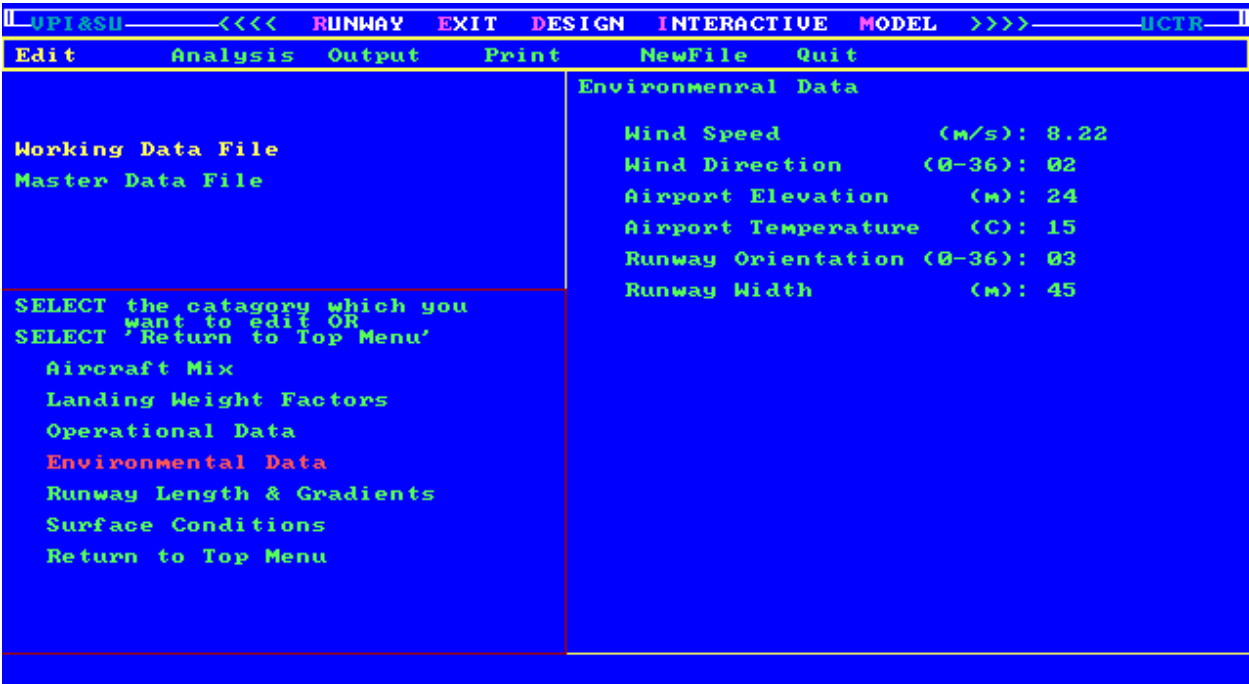


Figura A-3. Datos de partida. REDIM.

Los resultados que arroja el programa se traducen en tiempos de ocupación de pista o “ROT” que, como se ha mencionado, se corresponden con el valor “t4”. En la siguiente captura se muestra la tabla de ROT que genera el programa tras ejecutar el algoritmo.

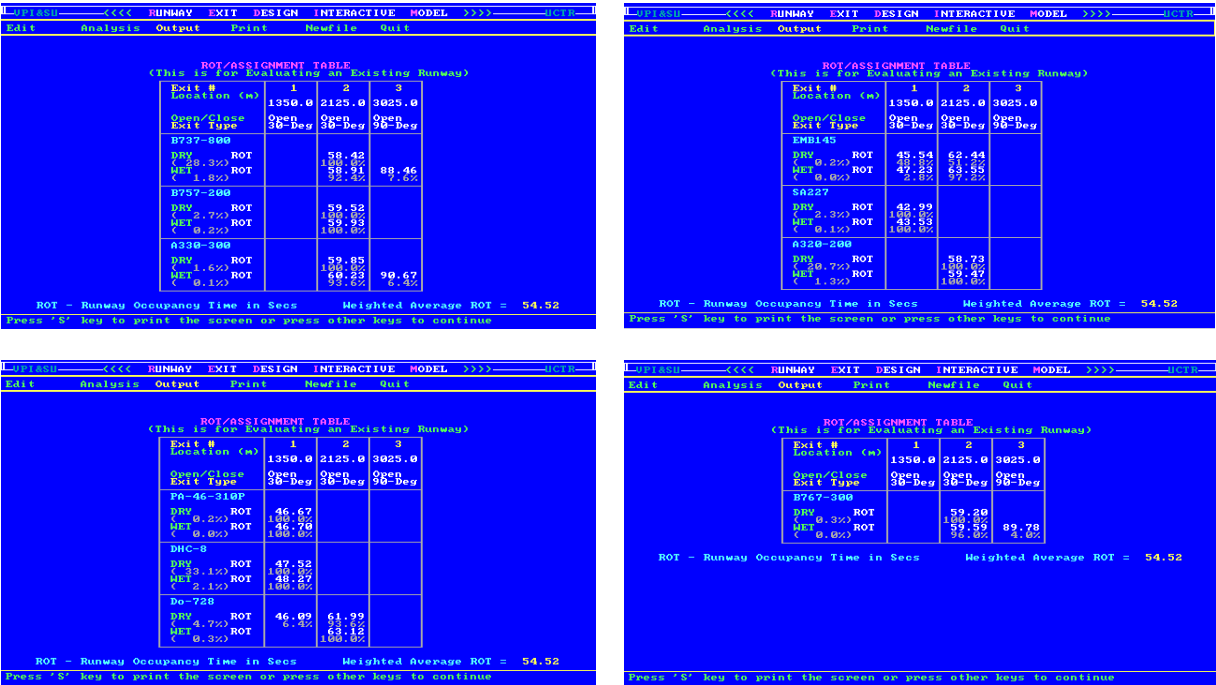


Figura A-4. Tablas de resultados ROT. REDIM

Del mismo modo, el programa arroja una serie de gráficos que muestran los tiempos de ocupación de pista obtenidos por cada una de las aeronaves que componen la mezcla. Estos se muestran a continuación.



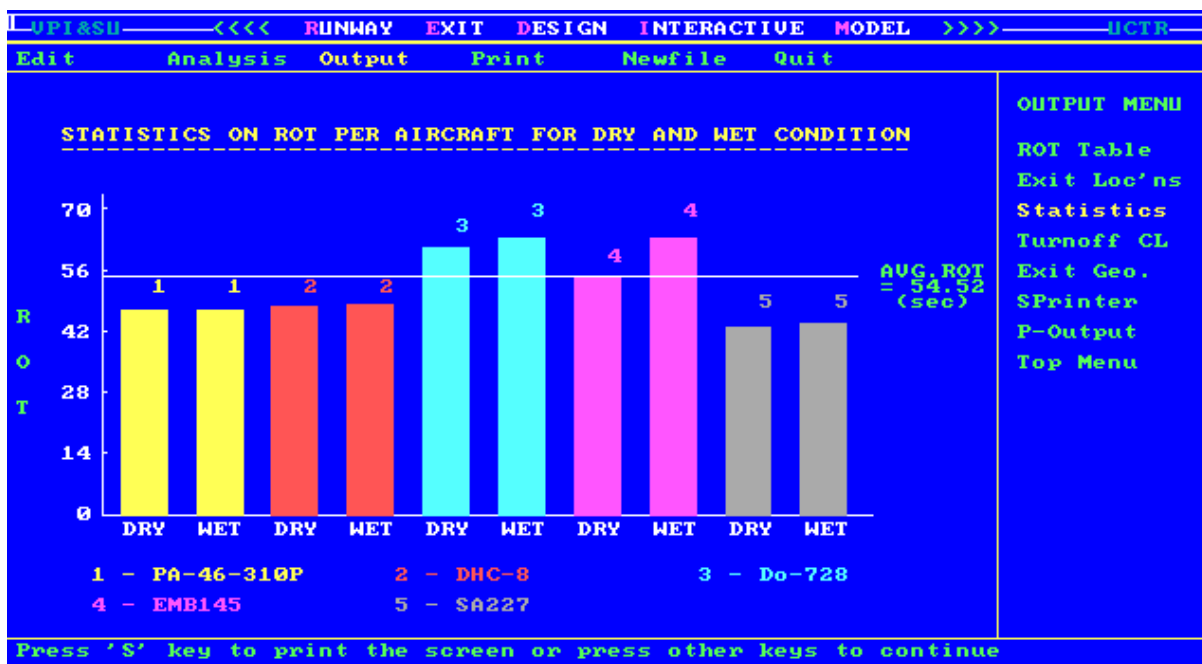


Figura A-5. Gráficos de resultados ROT 1. REDIM

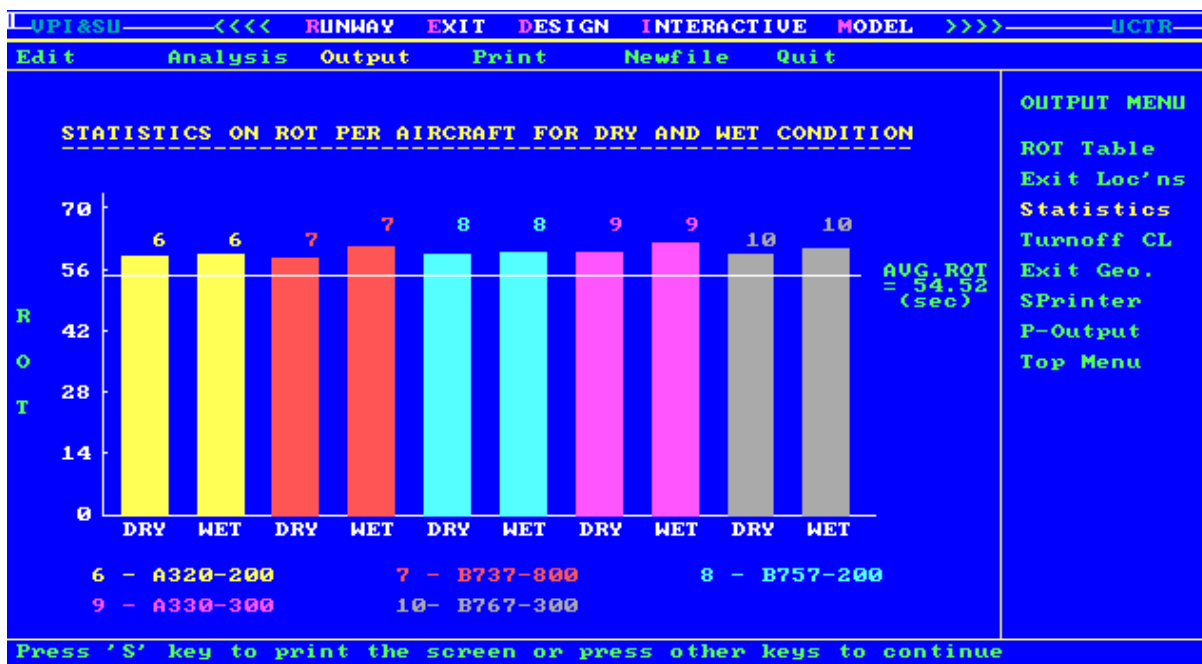


Figura A-6. Gráficos de resultados ROT 2. REDIM

## REFERENCIAS

- [1] Agencia Estatal de Meteorología, «Valores climatológicos normales. Gran Canaria Aeropuerto,» [En línea].
- [2] Gobierno de Canarias, «Estadísticas de Transporte Aéreo,» [En línea]. Available: <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:69a1855c-838d-4e58-adb6-42564428874f>.
- [3] Dirección de Operaciones, Seguridad y Servicios. Departamento de Estadísticas. AENA, «Tráfico de pasajeros, operaciones y carga en los aeropuertos españoles,» 2018.
- [4] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), Anexo 10 Volumen I. Telecomunicaciones aeronáuticas, vol. Volumen I: Radioayudas para la navegación.
- [5] BEYOND, «GNSS performance assessment and data recording guidelines in aviation,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2016/icg11/wgc/09wgc.pdf>.
- [6] A. & S. A. & M. J. & I. A. & A.-J. A. & G. C. Al-Saegh, «Atmospheric Propagation Model for Satellite Communications,» 2014.
- [7] International Civil Aviation Organization, «Guide for Ground Based Augmentation System implementation,» May 2013.
- [8] Federal Aviation Administration, «Document 6884\_1. Sitting criteria for Ground Based Augmentation System (GBAS),» Dec 2010.
- [9] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), Anexo 14 Volumen I. Diseño y operaciones de aeródromos.
- [10] R. Geister, T. Ludwig, I. Jessen, «Installation and Validation of a GBAS Ground Station at the Research Airport Braunschweig-Wolfsburg,» Institute of Flight Guidance. German Aerospace Centre.
- [11] D. S. a. I. C. D. Flugsicherung, «LIZ Annual Summary,» 2018.
- [12] Fraport, «Monthly Traffic Results Frankfurt Airport,» December 2018.
- [13] Air Services Australia, «Movements at Australian Airports,» 2018 Calendar Year Totals.
- [14] European Aviation Safety Agency (EASA), «Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design (CS-ADR-DSN). Issue 4,» 8 December 2017.
- [15] ENAIRE, «AIP Aeropuerto de Gran Canaria,» AIP AMDT 312/19.
- [16] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, *Real Decreto 297/2013 de Servidumbres Aeronáuticas*, 26 de abril de 2013.

- [17] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, *Real Decreto 584/72 de Servidumbres Aeronáuticas*, 24 de febrero.
- [18] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), «Taller para instructores sobre cálculo de capacidad de pistas y sectores ATC,» Lima (Perú), Octubre 2011.
- [19] Federal Aviation Administration (FAA). US Department of Transportation, «AC 150/5060-5: Airport Capacity and Delay».
- [20] International Air Transport Association (IATA), «Airport Development Reference Manual,» 10th Edition October 2016.
- [21] Ministerio de Fomento. Dirección General de Aviación Civil (DGAC), «Plan Director del Aeropuerto de Gran Canaria,» Septiembre 2001.
- [22] WINDFINDER, «Estadísticas de viento en Gando, Gran Canaria,» [En línea].
- [23] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), «DOC 4444 (ATM/501). Gestión del Tránsito Aéreo,» Decimoquinta edición, 2007.
- [24] P. Ladoux y B. Roturier, «GBAS Implementation Status: International Context and Situation in France,» ICAO ACAC Workshop, Rabat, November 2017.
- [25] I. Ambrozová y S. Pleninger, «Implementation of GBAS System at the Václav Havel Airport,» July 2013.
- [26] AEMET, «Clima LPA,» [En línea].
- [27] M. d. Fomento, «Estimación económica del desarrollo previsible del Aeropuerto de Burgos,» Plan Director Aeropuerto de Burgos.
- [28] S. Magdaleno, «El impacto de la ionosfera en la navegación por satélite,» GMV , Madrid, 2012.
- [29] S. Saito, «Ionospheric effects on GBAS and mitigation techniques,» Electronic Navigation Research Institute (Japan), 2011.
- [30] (ICAO), International Civil Aviation Organization, «Performance-based Navigation (PBN) Manual. Doc 9613,» 2008.
- [31] H. E. Boukfaoui, «PBN Implementation from Industry perspective,» Airbus ProSky, Cairo, 2015.
- [32] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, Understanding GPS. Principles and Applications, Second Edition.
- [33] P. Callejo, A. Alvarez y F. J. d. Blas, «AENA GBAS CAT I Implementation at Malaga Airport: Towards an Operational GNSS Landing System».
- [34] Federal Aviation Administration (FAA), «Ground Based Augmentation System. Concept of Operations (GAST-D),» Version 1, 2016.